



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI S POUŽITÍM RADARU

RANGE MEASUREMENT USING RADAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ SEKERA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje měření vzdálenosti za pomoci frekvenčně modulovaného radaru se spojitou vlnou. Nejprve je uveden způsob, jakým se radarový signál zpracovává. Následně jsou popsány vhodné metody pro měření vzdálenosti a jejich principy. Nakonec jsou zvolené metody vyzkoušeny na naměřených datech a je provedeno jejich vyhodnocení.

Abstract

This bachelor thesis is focused on range measurement with a frequency modulated continuous wave radar. First of all, radar signal processing will be presented. Furthermore, will be described a suitably choosen methods and their principles. In the end, a choosen methods will be tested on measured data and subsequently their evaluation is performed.

Klíčová slova

radar, měření vzdálenosti, zpracování signálu, Dopplerův jev, lineární frekvenční modulace

Keywords

radar, range measurement, signal processing, Doppler effect, linear frequency modulation

Citace

Tomáš Sekera: Měření vzdálenosti s použitím radaru, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Měření vzdálenosti s použitím radaru

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka

.....

Tomáš Sekera
15. května 2013

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, Ing. Lukáši Maršíkovi za odbornou pomoc, když jí bylo nejvíce třeba, a také za vedení s motivací k lepší práci.

© Tomáš Sekera, 2013.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	2
2	Radarové technologie v současnosti	3
2.1	Radar	3
2.2	Dopplerův jev	5
2.3	Frekvenční modulace	7
3	Zpracování radarového signálu	8
3.1	Analogově digitální převod	8
3.2	Předzpracování signálu	10
3.3	Frekvenční analýza	12
4	Metody pro odhad vzdálenosti	15
4.1	Princip měření	15
4.2	Lineárně frekvenční modulace	16
4.3	Metody pro detekci více objektů	19
4.4	Chyby v měření	24
5	Implementace	26
5.1	Návrh řešení	26
5.2	Použité nástroje	28
5.3	Implementace modulu	28
6	Vyhodnocení	29
6.1	Získání dat	29
6.2	Prověření metod	30
6.3	Testování aplikace	35
6.4	Zhodnocení výsledků	37
7	Závěr	40
A	Obsah DVD	42

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době technika umožňuje pozorovat i zkoumat dění v okolí čím dál detailněji a tím lze získávat informace, bez kterých by se řada průmyslových odvětví neobešla. Mezi takové je možné například zařadit dopravní průmysl, kde je často potřeba znát vzdálenost nebo rychlost objektů a k tomu je využíván radar.

Tato práce se věnuje měření vzdálenosti za použití frekvenčně modulovaného radaru o spojitě vlně, který dodává okamžité výsledky. Taková vlastnost bývá nezbytná kupříkladu v letectví, kde je využit jako výškoměr a hodnoty jsou nutně očekávány v co nejmenším časovém intervalu. Tímto nabízí výhody například v porovnání s kamerovým systémem, kdy dokáže podat informace o objektech, které nelze ani zpozorovat, ať už vlivem velké vzdálenosti nebo třeba nedostatkem osvětlení.

Měření vzdálenosti je u použitého typu radaru založeno zejména na jeho schopnosti frekvenční modulace, kde vhodně zvolený průběh umožní určení vzdálenosti měřeného objektu i v pohybu a to včetně jeho rychlosti. V současnosti lze přijatý signál analyzovat i zpracovat, již za použití běžně dostupného vybavení a to zejména počítače.

V kapitole 2 je uveden lehký úvod do radarové technologie v současnosti, její rozdělení a popis nezbytných náležitostí, jež jsou v tomto odvětví využívány. Kapitola 3 rozebírá postup zpracování signálu přijatého z radaru včetně jeho úprav, aby informace v něm obsažené bylo možné lépe rozeznat. Dále jsou v kapitole 4 rozebrány různé způsoby měření vzdálenosti, jejich využití i včetně chyb, které mohou mít výsledná data ovlivnit. Kapitola 5 pak popisuje návrh řešení a následnou implementaci aplikace. Konečné vyhodnocení včetně testování aplikace a prověření metod je uvedeno v kapitole 6, kde je i mimo jiné popsán způsob získání dat.

Kapitola 2

Radarové technologie v současnosti

V této kapitole jsou popsány principy radaru a jeho základní součásti. Následně jejich základní rozdělení dle způsobu jejich vysílání. V neposlední řadě je zde detailněji rozebrán Dopplerův jev a typy radarů, které ho využívají k měření rychlosti. Tyto technologie jsou dnes ve velkém měřítku používány a v určitých odvětvích, jako například letectví, by se bez nich ani nešlo obejít.

2.1 Radar

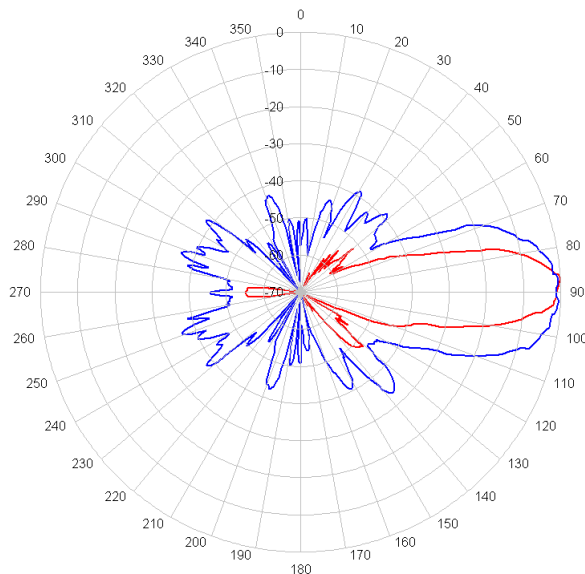
Radar je elektronické zařízení, které vysílá a přijímá elektromagnetické vlny o vysokých frekvencích v délce centimetrů až mikrometrů. Jeho základní princip spočívá v odeslání signálu a zachycení zpětně odraženého, typicky tedy obsahuje vysílač a přijímač. Mezi jeho primární účely patří identifikace, zaměření a určení vzdálenosti objektů, ovšem jeho využití je velmi rozsáhlé. Lze se s ním denně setkat a to zejména v dopravě, kde s jeho pomocí policie měří rychlost, v letectví a armádě pro navigaci. Využití se nachází i na poli meteorologie či jako detektor pohybu, kde lze v konečném důsledku rozeznat zda-li se jedná o člověka či nějaké zvíře.

Základní součásti radaru

Mezi základní součásti radaru může patřit takzvaný duplexer. Ten se využívá v případě, kde je využita pouze jedna anténa pro vysílání i příjem signálu. Tato součástka určuje zda-li přijatý signál putuje do přijímače a naopak vyslaný signál z vysílače. Tím je zabráněno jejich vzájemnému konfliktu, který by způsobil zkreslení signálu. Informace o popisovaných součástkách jsem čerpal z literatury [12].

Nezbytná součást radaru pro jeho funkčnost je anténa, která usměrňuje vyslanou energii do prostoru a zároveň ji také zpětně zachytává. Jinými slovy tedy spojuje radar s okolním světem. Anténa, která vytváří přímý a úzký svazek má obvykle velkou oblast pro přijetí, aby bylo možné přijmout i slabé odezvy signálu od měřeného objektu. Tato součást ovšem nejenom koncentruje energii na vysílači a přijímá zpětně odraženou, ale také slouží jako prostorový filtr pro určení úhlu, v jakém se objekt vůči radaru nachází. Na obrázku 2.1 lze vidět systémový diagram antény používané při této práci, který znázorňuje útlum vlny vlivem úhlu ve kterém se radar vůči objektu nachází. Azimut (modrá) a elevace (červená) je v tomto případě o rozsahu $25^\circ \times 12^\circ$.

Přijímač zesiluje přijatý signál na vhodnou úroveň, aby byl lépe rozpoznatelný. V jeho první fázi se většinou nachází takzvaný Low-noise amplifier (LNA), což je elektronický ze-



Obrázek 2.1: Systémový diagram antény modulu K-MC1 (převzato z datasheetu [10])

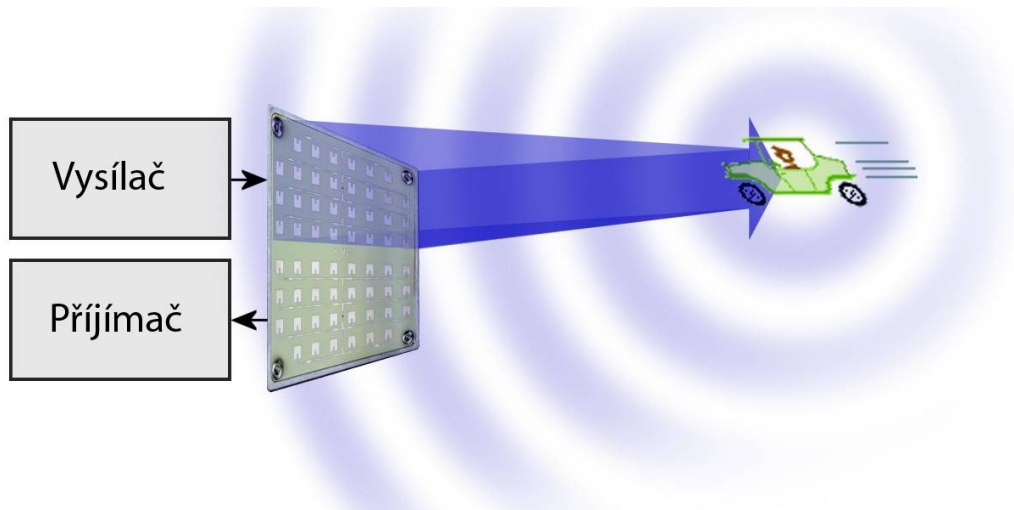
silovač určený zejména pro velmi slabé signály. Z okolí jsou ovšem obvykle přijímány i nechtěné odezvy z okolí (nazývané clutter), ty mohou ovlivnit detekci požadovaných objektů tím, že přijímač zahltí nepotřebnými informacemi. Je tedy nezbytné, aby měl dostatečně velký dynamický rozsah, který je předem definován jako poměr maximální a minimální síly vstupního signálu, se kterou je přijímač schopen pracovat.

Vysílač generuje signál o vysokém výkonu v podobě elektromagnetické vlny a posílá jej do antény. Většinou je zastoupen jako oscilátor nebo v podobě zesilovače. Je potřeba, aby vytvářel stabilní signál o vhodném tvaru vlny a také dostatečně silné vrcholy, aby bylo možné detekovat cíl na maximální možnou vzdálenost. V závislosti na typu radaru pak vysílač signál generuje po jednotlivých pulsech za daný čas nebo je vytvářen nepřetržitě. Také může umožňovat modulaci pro požadované specifiky vlny.

Rozdělení radarů

Základní typy radaru lze rozdělit na [8, 11] :

- **CW** (Continuous Wave) radar - vysílá nepřetržitý spojitý signál s konstantní (typicky nízkou) energií nejčastěji na kratší vzdálenosti. Kvůli neustálému vysílání jsou použity dvě oddělené antény. Při následné analýze signálu lze za působení Dopplerova jevu určit rychlost měřeného objektu, ovšem vzdálenost či nepohyblivý objekt nelze detekovat. Tento typ je často využíván jako policejní radar nebo detektor pohybu. Jednoduché znázornění tohoto typu lze nalézt na obrázku 2.2.
- **FMCW** (Frequency Modulated Continuous Wave) radar - jedná se zařízení, které také neustále vysílá a přijímá signál, ovšem je možné během jeho průběhu frekvenci modulovat. Zvyšování či snižování frekvence zapříčiní, že v zpětně odraženém signálu (v jedné modulační periodě) bude oproti vyslanému rozdíl ve frekvenci a tím zanechá časovou značku. Při vhodně zvoleném modulačním průběhu za její pomoci lze určit vzdálenost i rychlost objektu zároveň. Je navíc možné měřit a detekovat statické ob-



Obrázek 2.2: Znázornění CW radaru s dvěma anténami proti jedoucímu autu, kde zpětně odražený signál je ovlivněn Dopplerovým jevem (překreslené z [14])

jekty, což bez frekvenční modulace nebylo možné. Nejčastěji se tato varianta využívá jako výškoměr nebo parkovací senzor.

- **Pulse** radar - vysílá krátké pulsy vysokofrekvenční energie a operuje na dlouhé vzdálenosti. Je zde použita pouze jedna anténa, jelikož je vyslán puls a čeká se na jeho zpětnou odezvu. Za znalosti doby trvání zpětné odezvy pulsu lze určit vzdálenost detekovaného objektu, ovšem dosah radaru je právě četností opakovaných pulsů, které jsou vysílány, omezen. Tyto radary jsou následně vhodné pro meteorologii a řízení leteckého provozu.
- **Pulse-Doppler** radar - zařízení obdobně vysílá sekvenci vysokofrekvenčních pulsů, ale navíc využívá Dopplerova jevu. Odražené pulsy mají modifikovanou frekvenci vlivem pohybu měřeného objektu a tím lze určit jeho rychlost. Vzdálenost lze opět určit dobou trvání zpětných odrazů. Je více efektivní v prostředí, kde lze pravděpodobně zachytit nechtěné objekty (clutter), proto je využíván zejména v armádě či meteorologii, kde se právě využívá k měření rychlosti na velkou vzdálenost.

2.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev je známý fyzický fenomén, který popisuje změnu vlnové délky a frekvence přijímaného signálu oproti vyslanému signálu, způsobené nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače, kdy jeden objekt je v roli pozorovatele a druhý je zdroj vlnění.

V případě, kdy se zdroj vlnění přibližuje k pozorovateli, tak každá vlna je odeslána z pozice blíže k pozorovateli, než ta předchozí. Tudíž každé vlně zabere méně času dostat se k pozorovateli, oproti jeho předchozí. Pro pozorovatele je následně časový interval mezi přijetím vlny redukován a tím je zvýšena frekvence signálu. Naopak při pohybu zdroje vlnění od pozorovatele, je každá vytvořená vlna vyslána z pozice vzdálenější než předchozí. Časový interval přijetí vlny u pozorovatele je navýšen a frekvence se snižuje. Tato část byla čerpána z literatury [11] a internetového zdroje [4].

Za předpokladu, že zdroj i pozorovatel se pohybují po stejné přímce, tak vlnovou délku lze vyjádřit vztahem 2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Kde c je rychlost šíření vlny (rychlost světla), f je frekvence přijímaná pozorovatelem. V situaci, kdy se zdroj pohybuje s vysílanou frekvencí f_0 směrem k přijímači, tak stojící pozorovatel přijímá signál s frekvencí vyjádřenou vztahem 2.2

$$f = f_0 \frac{c}{c + v_s} \quad (2.2)$$

Zde c představuje rychlost šíření vlny a v_s rychlost zdroje vůči pozorovateli, kde kladná rychlost znamená přibližování a záporná oddalování. Jestli zdroj je stacionární a pohybuje se pozorovatel, tak je frekvence vyjádřena vztahem 2.3

$$f = f_0 \frac{c + v_p}{c} \quad (2.3)$$

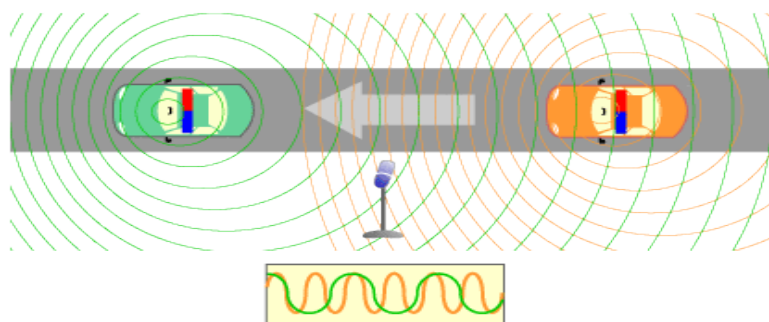
Situace je zde obdobná, ale v_p nyní představuje rychlost pozorovatele vůči zdroji, která je opět u přibližování kladná a vzdalování záporná.

Jako nejběžnější příklad pro ilustraci se uvádí jedoucí auta se sirénou znázorněna na obrázku 2.3. Ta projíždí okolo pozorovatele a jejich sirény vydávají tón o stejné výšce. Zvuk sirény auta, které se vzdaluje od pozorovatele je vnímán jako stále nižší, kdežto přibližující auto se svým zvukem jeví jako stále hlasitější.

V radarových technologiích je Dopplerova jevu využito zejména v měření rychlosti objektu. Vysílaná frekvence radaru je od pohybujícího se objektu ovlivněna Dopplerovým posunem a to buď snížena nebo zvýšena. Rovnice pro určení relativní rychlosti objektu k radaru je pak vyjádřena vztahem 2.4.

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t} c \quad (2.4)$$

Kde f_d představuje Dopplerovu frekvenci, f_t je frekvence vysílaná radarem a c je rychlost světla ve vakuu. Objekty, které se nepohybují, jsou v tomto případě pro radar využívající pouze Dopplerův jev neviditelné, jelikož vysílaná frekvence bude stejná jako přijatá a tím se navzájem vyruší.



Obrázek 2.3: Znázornění Dopplerova jevu, kde okolo pozorovatele (mikrofon) projíždí auta se sirénou ¹

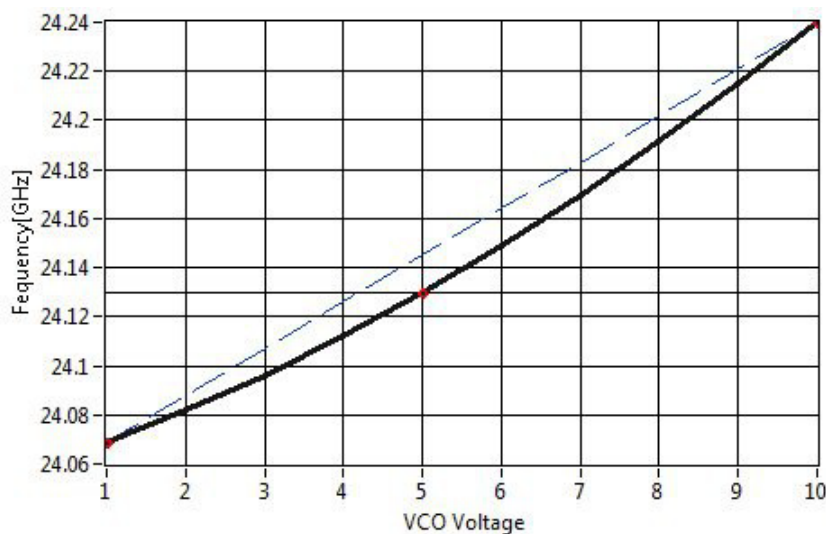
¹Obrázek byl převzat ze stránek <http://cs.wikipedia.org/>

2.3 Frekvenční modulace

V předchozí sekci byl zmíněn FMCW radar, který je schopen frekvenční modulace a ta v konečném důsledku radaru se spojitou vlnou umožňuje získat informaci o vzdálenosti měřeného objektu. Použití frekvenční modulace v radarové technologii je podrobněji rozebráno v kapitole 4. Následující informace byly čerpány z práce [8] a internetového zdroje [9].

Frekvenční modulace je okamžitá změna kmitočtu nosné vlny, jinými slovy dochází ke změně vysílané frekvence signálu, kde fáze ani amplituda se nemění. Naopak u amplitudové modulace se mění amplituda nosného signálu a frekvence s fází zůstává nezměněna. U radaru je frekvenční modulace umožněna změnou napětí na oscilátoru, který je součástí radaru a je k němu zabudované ovládání. Napětím řízený oscilátor může být nastaven stejnosměrným napětím na vhodném vstupu. Tvar vlny aplikovaného signálu tedy poté utváří vysílanou frekvenci modulované vlny. Lze vytvářet modulační průběhy různých tvarů, které nám při správném postupu dovolí získat informace navíc.

Při použití lineárně frekvenční modulace, což se řadí mezi metody pro detekci vzdálenosti, je potřeba, aby změna frekvence byla co nejvíce lineární. Ovšem linearita napětím řízeným oscilátorem není ve většině případů zcela dodržena, jak lze vidět na obrázku 2.4. To může pravděpodobně ve výsledném spektru způsobit odchýlení frekvence od její přesné hodnoty. Výrobci radarů však dodávají většinou potřebné softwarové nástroje, které umožňují korekci na čistě lineární průběh. Není ale zaručeno, že i dodanými prostředky se podaří vždy vytvořit ideální průběh.



Obrázek 2.4: Znázornění lineárního průběhu K-MC1 radarového modulu, kde modulace není zcela lineární (převzato z datasheetu [10])

Kapitola 3

Zpracování radarového signálu

V této kapitole bude uveden způsob, jak se signál z radaru zpracovává. Nejprve je rozebráno základní předzpracování, jelikož přijímaný signál je analogový a jako takový nelze na počítači upravovat. Je potřeba nejprve převést ho na digitální za pomoci **A/D** převodníku uvedeného v kapitole 3.1. Po získání digitální formy je potřeba signál ještě upravit do vhodné podoby, aby byl použitelný na diskrétní Fourierovu transformaci neboli **DFT**, která je rozebrána v kapitole 3.3, kde je signál převeden z časové domény do frekvenční.

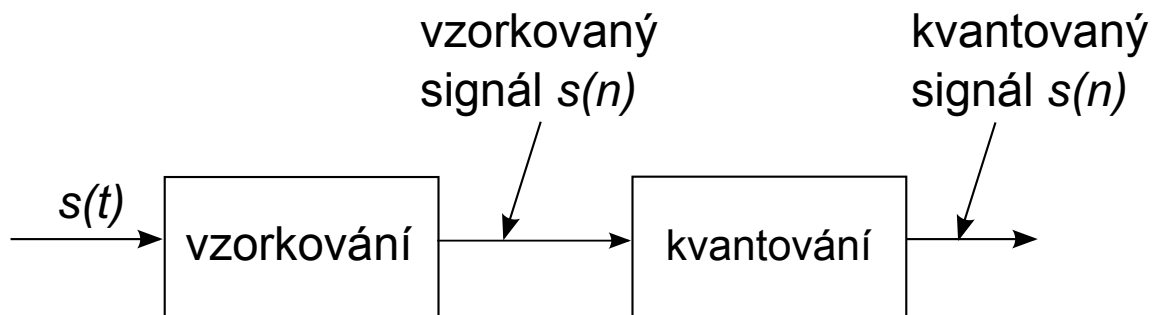
3.1 Analogově digitální převod

Pro práci se signálem na počítači je potřeba mít signál v digitální podobě, což umožňuje právě A/D převodník. Převod lze rozdělit na dva procesy, jak je ilustrováno na obrázku 3.1. Text vychází z internetového zdroje [9].

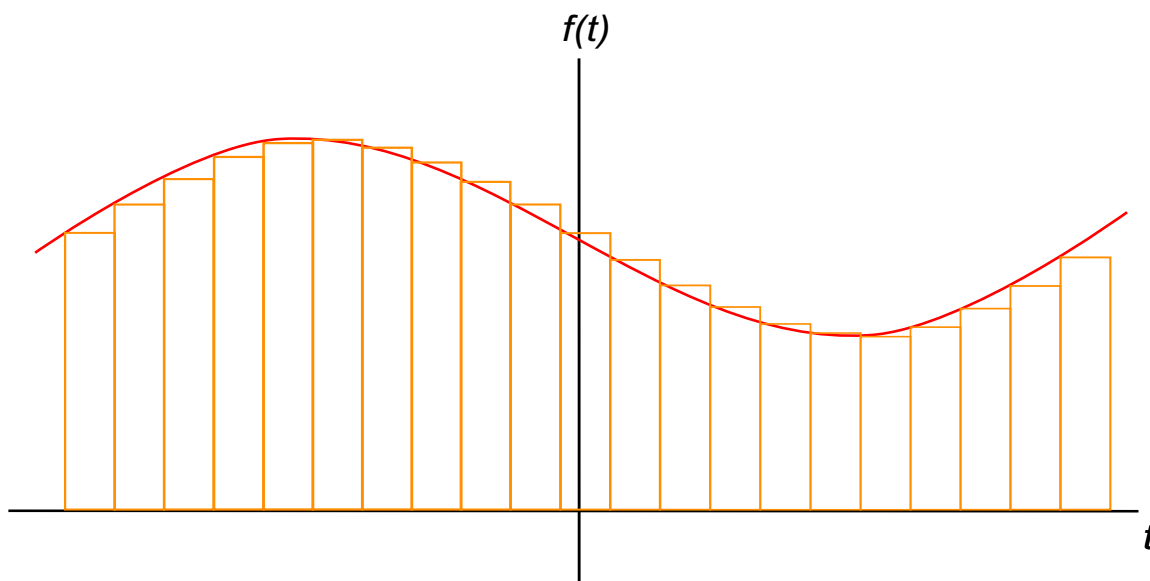
Vzorkování

Vzorkování se provádí pomocí periodických obdélníkových impulsů nenulové šířky. Je nutné tyto impulsy navrhnout tak, aby nevzniklo zkreslení způsobené zvolenou šířkou obdélníku. Navzorkovaný signál lze vidět na obrázku 3.2.

Při vzorkování je vhodné se vyvarovat jevu zvaném aliasing, který znemožňuje signál zpětně rekonstruovat. Ten je závislý na vzorkovací frekvenci, která určuje počet vzorků za sekundu. Aby se aliasingu zabránilo, musí být dodržen vzorkovací teorém, který lze vyjádřit vztahem 3.1



Obrázek 3.1: Schéma principu A/D převodníku



Obrázek 3.2: Navzorkovaný signál (překresleno z internetového zdroje [9])

$$Fs > 2f_{max} \quad (3.1)$$

Jinými slovy lze říci, že maximální frekvence obsažená v signálu musí být nižší, než polovina vzorkovací frekvence.

Kvantování

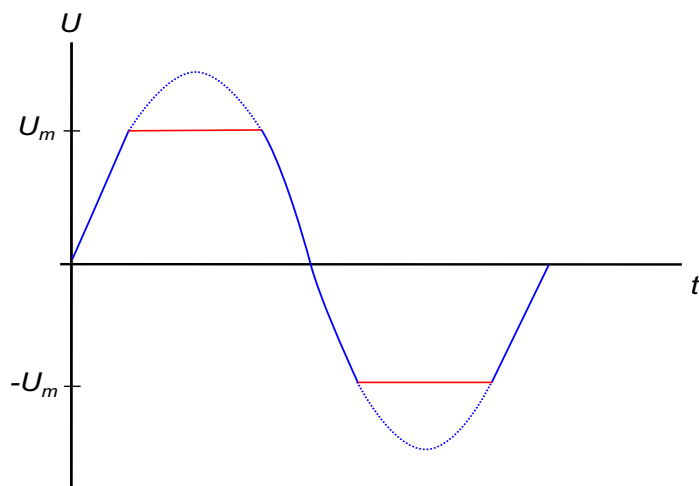
Jedná se o proces jednorozměrné úrovně diskretizace. Podstatou jeho činnosti je zaokrouhlení hodnot signálu získaného při vzorkování na předem definované kvantizační hladiny. Jejich počet je určen vztahem 3.2

$$L = 2^b \quad (3.2)$$

Kde b představuje počet bitů pro jeden vzorek. Nejvyšší kvantizační hladina nám udává hranici, jež nesmí amplituda vstupních vzorků nikdy přesáhnout. Pokud se tak stane, tak je signál omezen a dochází k tvarovému zkreslení. Při zpětném převodu z digitálního signálu do analogové formy se projeví a nelze tím získat původní signál. Takto omezený signál lze vidět na obrázku 3.3.

Maximální hodnoty amplitudy jsou zde seříznuty, jelikož signál se nacházel mimo rozsah A/D převodníku. Hodnoty původního signálu se tedy k dalšímu zpracování nepřenášejí přesně, ale vždy jako celočíselné hodnoty dané hladinami. Po převodu do analogového signálu se objeví kvantizační zkreslení podobné šumu, proto se toto zkreslení nazývá kvantizační šum.

Pro zjištění jak moc je signál kvantováním narušen, lze porovnat poměr signálu k šumu neboli *signal to quantization noise ratio*.



Obrázek 3.3: Tvarově zkreslený signál, kde omezení hodnot je vyznačeno červenými čarami (překresleno z internetového zdroje [9])

3.2 Předzpracování signálu

Signál po převodu je potřeba ještě několika způsoby rozdělit a poupravit, aby byl vhodný pro další postup.

Nejprve je rozumné signál rozčlenit na řadu krátkých segmentů o stejné délce. Segment by měl však obsahovat dostatek vzorků, aby měl v každém alespoň jednu celou periodu. Následně je odstraněna stejnosměrná složka. Na každý segment se aplikuje Hammingova okenní funkce, aby byl vybraný úsek signálu zdánlivě periodický a tedy následně vhodný pro zpracování diskrétní Fourierovou transformací. Aby byly špičky ve spektru přesněji umístěné, je dobré použít metodu zvanou zero padding, kdy na konec segmentu přidáme nuly a tím bude spektrum lépe vyhlazené.

V následujících částech budou tyto postupy detailněji rozebrány. Následující informace byly čerpány z práce [8] a literatury [7].

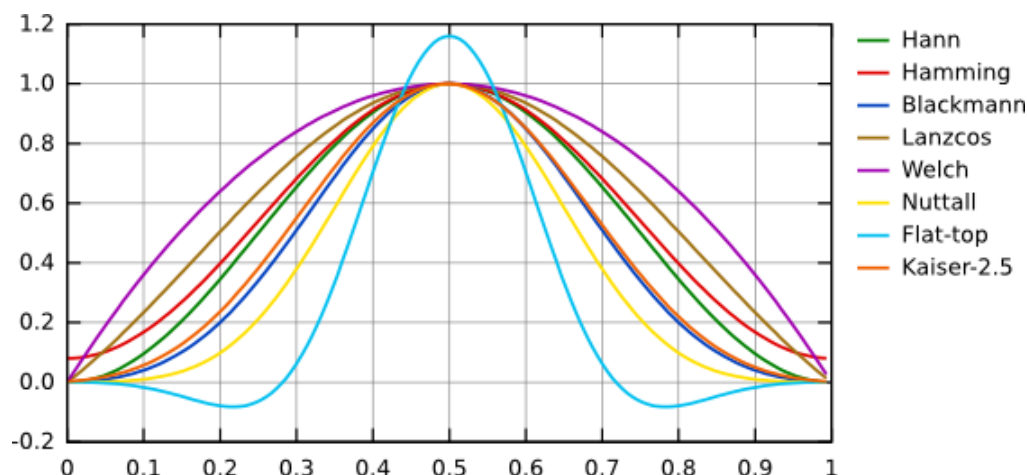
Stejnosměrná složka

Po použití A/D převodníku se v signálu vyskytuje menší stejnosměrná složka, která je vyjádřena jako střední hodnota signálu. Jestliže se blíží tato hodnota nule, pak v signálu se stejnosměrná složka nevyskytuje.

V případě, že se vyskytne a nebude odstraněna, tak při následné frekvenční analýze může způsobit problémy v podobě výrazné stejnosměrné složky u frekvenčního spektra a pravděpodobně může zastínit požadované informace v signálu.

Odstranění takové složky, lze rozdělit na:

- **Odstranění po segmentech** - tento způsob lze použít, pokud signál nezpracováváme v reálném čase. Data se signálem jsou doručována po segmentech předem známé a neměnné délky. Odstranění v takovém případě je poměrně jednoznačné. Vypočítá se střední hodnota signálu podle vzorce 3.3 a je od každého segmentu následně odečtena.
- **Odstranění v reálném čase** - pro systémy, kde je potřeba odstranění stejnosměrné složky v reálném čase, se využívá zejména filtrů. Ty generují dlouhodobou predikci střední hodnoty signálu, kterou je možné ihned odstranit.



Obrázek 3.4: Nejběžnější používaná okna (převzato z práce [8])

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N sig[n] \quad (3.3)$$

Okenní funkce

Při použití DFT je potřeba mít signál periodický, protože jej vidí jako za sebou opakující se segmenty. Jelikož předem rozdělené segmenty mají okraje typicky odlišné, tak tyto diskontinuity zapříčiní, že po provedení DFT se ve spektru projeví rozptyl, jež je možné vidět na obrázku 3.5.

Pro zamezení vzniku takového rozptylu se využívá funkce okna. Její aplikací se redukuje okrajové vzorky a celkově změní tvar signálu do stavu, kdy se stává zdánlivě periodickým.

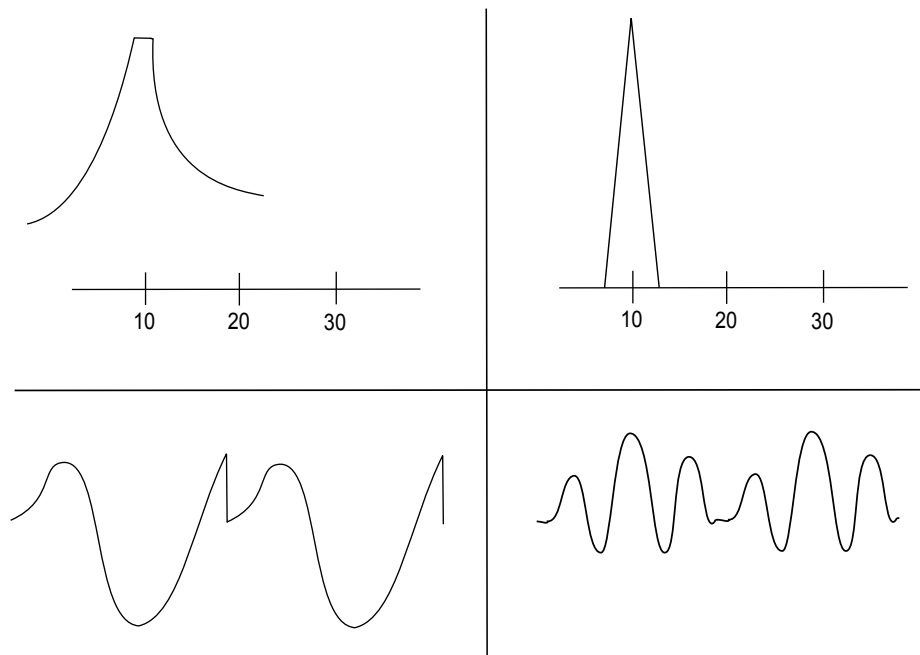
Existuje mnoho typů těchto funkcí (viz. obrázek 3.4), ovšem pro různé druhy signálu je nutno vybrat tu správnou, protože každá ovlivňuje určitým způsobem frekvenční a amplitudové rozlišení. Z celé škály těchto oken je nejvhodnější Hammingovo nebo Hannovo. Obě okenní funkce jsou vhodné pro náhodné signály, zároveň mají dobré frekvenční a amplitudové rozlišení. Navíc pro tento typ signálu neefektivněji potlačí rozptyl.

Jediná jejich nevýhoda spočívá v tom, že okrajové hodnoty signálu jsou zeslabeny a může tak dojít k částečnému utlumení informace v signálu. Řešením je při dělení signálu na segmenty brát určité procento vzorků z následujícího. Tím bude mít okrajové hodnoty naplněny i z okolních segmentů a nebude zde docházet ke utlumení dat po aplikaci okna. V případě, kde signál frekvenčně modulujeme a každý segment má specifický tvar se překrývání nepoužívá.

Zero padding

Po aplikaci okna je vhodné na konec zpracovávaného vzorku přidat nuly. Tomuto procesu se říká *zero padding* a slouží k zvětšení rozlišení výsledného spektra.

Frekvenční spektrum po provedení DFT nemusí obsahovat dostatek bodů pro přesné určení maximální amplitudy a bylo by nutné interpolovat. Přidáním nul na konec signálu jej na úrovni dat nějak nezmění, ovšem po provedení DFT se nám zobrazí více bodů a nejvyšší špička ve spektru bude přesněji dané frekvenci odpovídat. Čím více nul je na konec



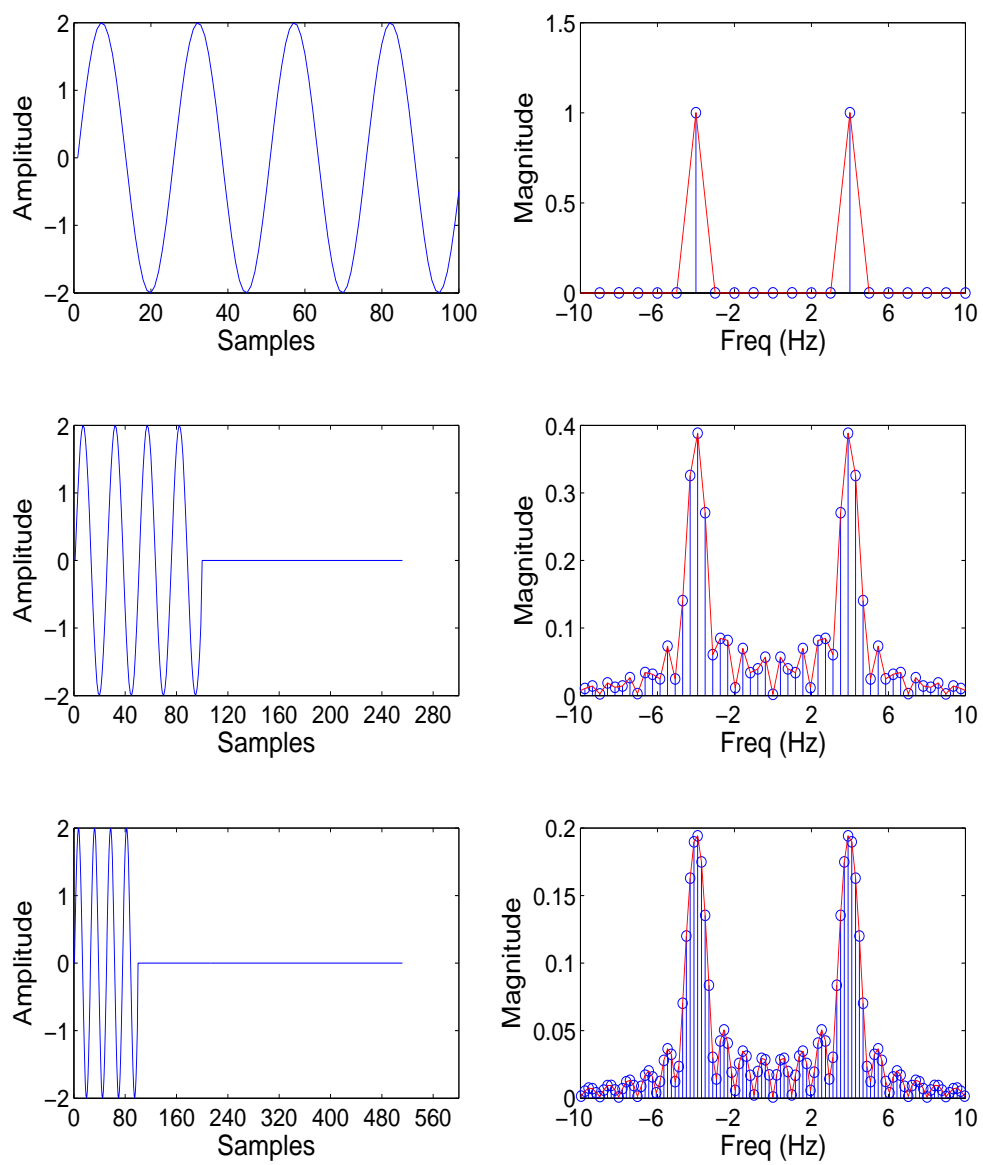
Obrázek 3.5: Vlevo signál s rozptylem (v původním signálu je diskontinuita), vpravo signál bez rozptylu (původní diskontinuity vyhlazeny funkcí okna) (překresleno z internetového článku [1])

přidáno, tím bude výstup detailnější, ale v určitém případě, kdy rozlišení už bude dostatečné a stále by se přidávalo více nul, tak se proces může jevit jako kontraproduktivní. Výsledek je demonstrován na obrázku 3.6.

3.3 Frekvenční analýza

Signál je reprezentován v časové doméně a pro získání potřebných informací ze signálu pro další analýzu je potřeba převedení do frekvenční domény. Mezi metody, které k tomu slouží se řadí Fourierova řada (FŘ) a Fourierovy transformace. Kde Fourierova řada umožňuje vyjádřit libovolný periodický signál pomocí komplexních exponenciál. Je-li ale potřeba popsat i jiný signál než periodický, tak je použita Fourierova transformace, která se vyjadřuje pomocí harmonických signálů, tedy funkce komplexní exponenciály. Signál převedený do frekvenční oblasti se nazývá spektrum.

Jelikož v radarovém signálu se po převodu pracuje s diskrétními hodnotami a signál nemá nekonečnou délku, tak je potřeba použít diskrétní Fourierovu transformaci (DFT). Pokud navíc máme signál již v komplexní podobě připravený na aplikaci DFT, tak ve výstupu bude odpovídající špička u frekvenčního spektra pouze v kladné nebo záporné části. Naopak když je použit reálný signál, tak výsledné spektrum je symetrické a špička se nachází v obou částech. Následující informace byly čerpány z literatury [3], [2] a internetového článku [1].



Obrázek 3.6: Vliv zero paddingu na výsledné rozlišení spektra

Diskrétní Fourierova transformace

Zkráceně DFT se od FŘ liší tím, že zde známe vzorky signálu z konečného intervalu. Jako vstup tedy pojme N hodnot a vrátí stejný počet ve výstupu. Ten je reprezentován jako sekvence hodnot ve frekvenčním rozsahu, vyjádřen je komplexními čísly. Vztah DFT se dá popsat vzorcem 3.4.

$$F[m] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n]e^{-2\pi mn/N}, m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.4)$$

Kde $F[m]$ je komplexní výstup jako součet komplexních exponenciál ve frekvenčním rozsahu, $f[n]$ je vstup jako diskrétní hodnoty v časovém rozsahu, ovšem může jím být i sekvence komplexních čísel, N je celkový počet všech vzorků, n je index v časovém rozsahu a m je již index ve frekvenčním rozsahu.

Ačkoliv je DFT nejvíce jednoznačná matematická procedura pro převedení z časové domény do frekvenční, tak co se týče počtu operací je velice neefektivní (3.5).

$$N^2 \quad (3.5)$$

N zde představuje počet vstupních vzorků. V případě, kdy množství vstupních vzorků vzrůstá, tak výpočty jsou až příliš zdlouhavé. Proto vznikl algoritmus nazývaný rychlá Fourierova Transformace (FFT).

Rychlá Fourierova Transformace

Jedná se o velice efektivní algoritmus pro výpočet DFT. Podává nám stejné hodnoty, ovšem jeho implementace je mnohem rychlejší. Počet potřebných operací je vyjádřen vztahem 3.6

$$N \log_2 N \quad (3.6)$$

Kvůli své rychlosti je dnes tento algoritmus hojně používán a je vhodný pro aplikaci na signál přijímaný z radaru. Existuje více druhů implementací, ovšem všechny podávají přesný výsledek, jejich princip spočívá v tom, že si vstupní vzorky dělí na menší části a v závislosti na druhu implementace s nimi pracují, či dělí ještě na menší.

Spektrální hustota výkonu

Uváděná pod zkratkou PSD (power spectral density) se používá k označení frekvencí jež jsou ve spektru nejvíce zastoupeny, tedy která má největší výkon. Jako vstup se používá frekvenční rozsah získaný z FFT. Na vzorci 3.7 lze vidět jak výpočet probíhá a získaný výsledek je v decibelech.

$$X_{dB}(m) = 10 \log_{10}(|X(m)|^2) \quad (3.7)$$

Jedná se tedy pouze o absolutní hodnotu modulu komplexního čísla na druhou. Logaritmus zde zapříčiní, že bude rozlišení slabších amplitud viditelnější.

Kapitola 4

Metody pro odhad vzdálenosti

V této kapitole bude uvedeno jaké metody se používají k určení vzdálenosti za pomoci FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radaru, který neustále signál vysílá a přijímá. Pro měření vzdálenosti je nutné, aby radar byl schopný frekvenční modulace. To znamená, že vysílaná frekvence radarem se dá snížit, či zvýšit a tím vytvářet signál určitého tvaru. Protože radar, který využívá pouze Dopplerova jevu, tak objekt který se nepohybuje, je pro něj bez frekvenční modulace nezachytitelný. To je dáno tím, že objekt stojící na místě nevytváří žádnou frekvenci a radarem vyslaná a zpětně odražená frekvence od objektu je stále stejná. Avšak při správně zvolené modulaci lze za pomoci metod o objektu určit jak vzdálenost, tak i jeho rychlost.

Bude vysvětlen základní princip měření a jakým způsobem signál modulovat, aby bylo dosaženo co největšího informačního zisku. Popsány také budou i jiné metody a obecné postupy pomocí kterých můžeme detekovat více objektů naráz. Dále budou uvedeny i základní chyby, které mohou měření vzdálenosti ovlivnit.

4.1 Princip měření

Jak již bylo uvedeno, radar vysílá elektromagnetickou energii k objektu a získává o něm informace odchycením zpětně odražené energie. Pokud se vezme v potaz, že vysílač a přijímač jsou na jednom zařízení a elektromagnetická vlna se pohybuje rychlostí světla (4.1), tak vzdálenost R může být vyjádřena vztahem 4.2. Následující text byl čerpán z literatury [11] a práce [13].

$$c = 3 * 10^8 m/s \quad (4.1)$$

$$R = \frac{c}{2} \tau \quad (4.2)$$

Kde R je vzdálenost vyjádřená v metrech, τ je časový rozdíl mezi vyslanou a přijatou energií a c je rychlost světla. Faktor $1/2$ je zde potřeba pro vyjádření opoždění, kvůli cestě signálu tam a zpět.

Pro získání rychlosti objektu se využívá Dopplerova jevu, který posunuje centrum frekvenční vlny v závislosti jeho pohybu. Jestli se objekt pohybuje směrem k radaru, bude frekvence pozitivní, naopak pohybem od radaru se frekvence stává negativní. Pomocí vztahu 4.3 lze vyjádřit výpočet rychlosti.

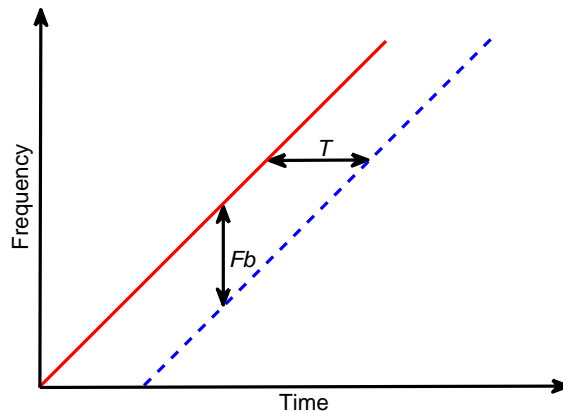
$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c \quad (4.3)$$

Kde f_d je Dopplerova frekvence, f_t je frekvence vysílaná radarem a c je rychlost světla.

4.2 Lineárně frekvenční modulace

Signál vysílaný radarem je modulován lineárně v čase, jak lze vidět na obrázku 4.1. Frekvence je během času měněna a to buďto zvyšována nebo snižována. Tento způsob zanechává časovou značku ve frekvenci, kdy vysílaná a přijatá frekvence se bude lišit. Díky tomu je možné určit časový rozdíl a pomocí něj vypočítat vzdálenost. Hledaná frekvence označovaná jako beat frekvence je rozdílem vysílaného a přijímaného signálu. Při pohybu objektu lze však očekávat, že bude přítomen Dopplerův jev a s vhodnou metodou je možné spočítat vzdálenost i rychlost zároveň. V některých technikách naopak Dopplerův jev způsobuje chyby v měření. Také je potřeba, aby modulace byla lineární, popřípadě byly dále aplikovány korekce.

V základní podobě je možné měřit jednotlivé objekty. Za situace více měřených objektů na scéně, lze metody kombinovat za účelem efektivního rozeznání jednotlivých objektů. Vhodné variace jsou uvedeny a popsány části 4.3. Následující informace byly čerpány z prací [8], [6] a [13].

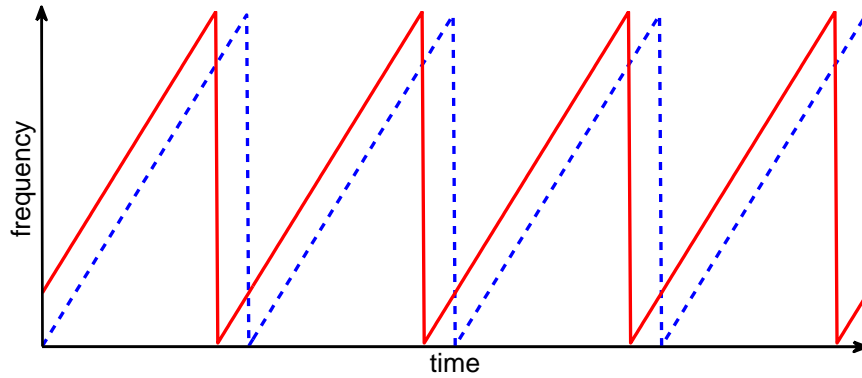


Obrázek 4.1: Lineární frekvenční modulace, kde plná čára znázorňuje vysílaný signál a přerušovaná přijatý

Zde F_b je beat frekvence, pokud zde není žádný Dopplerův posun tak se jedná o frekvenci pro určení vzdálenosti. T je zde jako časové zpoždění mezi signály.

Sawtooth modulace

Sawtooth je nejjednodušší typ lineární modulace. Tvar její vlny je buď lineárně zmenšován (down-chirp) nebo zvětšován (up-chirp), jak lze vidět na obrázku 4.2, kde na první pohled připomíná zuby od pily, od toho je také její název odvozen. Frekvence vysílaného signálu je buď periodicky zvyšována či snižována v definovaném intervalu.



Obrázek 4.2: Sawtooth modulace, červený signál je vysílaný a modrý přijímaný

Nevýhodou této modulace je, že nelze měřit pohybující se objekty, protože nelze od sebe oddělit frekvenci pro vzdálenost a Dopplerovu. Je tedy pouze schopna určit vzdálenost nepohybujících se objektů. V situaci, kdy k pohybu dojde, tak vlivem Dopplerova jevu se zkrátí nebo prodlouží detekovaná vzdálenost.

Trojúhelníková modulace

Modifikací předchozí metody lze dosáhnout detekce objektu v pohybu a proto je možné měřit rychlost i vzdálenost zároveň. Vlna se periodicky střídá v kombinaci lineárního zvětšování (up-chirp) a zmenšování (down-chirp). Nedochozí zde tedy k okamžité změně frekvence, jako tomu bylo v modulaci typu Sawtooth. Informace o této metodě byly čerpány zejména z práce [13] a literatury [11].

Frekvence pro určení vzdálenosti je pro up-chirp část negativní a down-chirp pozitivní, jestliže jsou absolutní hodnoty obou frekvencí podobné, tak se měřený objekt nepohybuje. Pokud se liší, znamená to, že objekt je v pohybu, protože frekvence byly pozměněny Dopplerovým jevem.

Na obrázku 4.3 lze vidět výsledný signál nepohybujícího se objektu. Kde Δf vyjadřuje modulační hloubku, t_m periodu modulace, f_b je beat frekvence a τ představuje časový rozdíl mezi signály, který lze vyjádřit vztahem 4.4.

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (4.4)$$

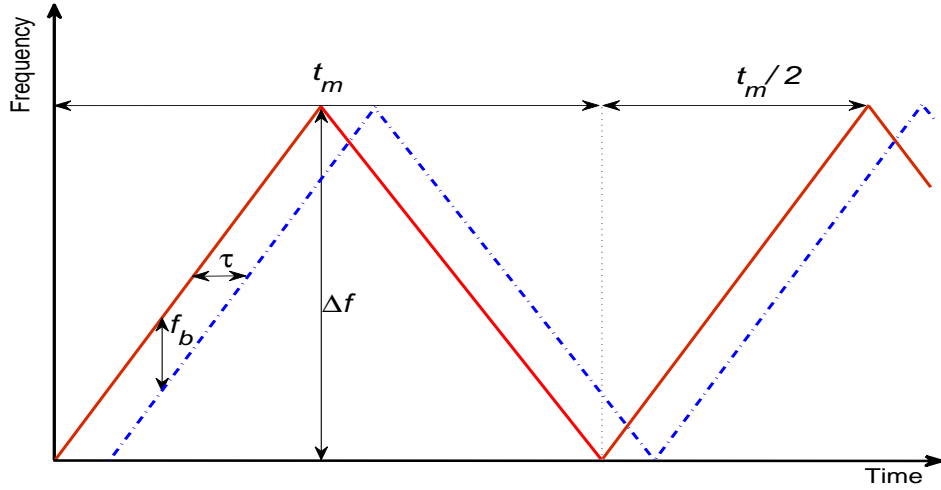
Pokud se tedy měřený objekt nepohybuje, tak beat frekvence odpovídá hledané frekvenci pro vzdálenost jak vyjadřuje vztah 4.5.

$$f_b = f_r \quad (4.5)$$

Pro výpočet vzdálenosti z předchozích vztahů se musí brát v potaz, že perioda modulace t_m je poloviční, což se rovná buď up-chirpu nebo down-chirpu. Beat frekvence v případě, kdy se objekt nepohybuje je vyjádřena vztahem 4.6.

$$f_b = f_r = \frac{\Delta f}{t_m/2} \tau = \frac{2\Delta f}{t_m} \frac{2R}{c} = \frac{4\Delta f R}{t_m c} \quad (4.6)$$

Po přeskládání vzorce lze vypočítat vzdálenost uvedenou ve vztahu 4.7



Obrázek 4.3: FMCW trojúhelníková modulace signálu nepohybujícího se objektu, kde červená čára představuje vysílaný signál a modrá přijatý

$$R = \frac{t_m c}{4 \Delta f} f_r \quad (4.7)$$

Pokud ovšem měřený objekt bude v pohybu, tak frekvence bude ovlivněna Dopplerovým jevem, což způsobí, že frekvenční i časový posun bude buď navýšený nebo snížený. Na obrázku 4.4 lze vidět signál přibližujícího se objektu.

Beat frekvenci označovanou jako f_{b+} (up-chirp) lze vyjádřit v podobě rozdílu mezi frekvencí vzdálenosti a Dopplerovou frekvencí, jak je znázorněno na vzorci 4.8. Na druhou stranu podobně při klesající části f_{b-} , je beat frekvence jejich součtem, znázorněno na vzorci 4.9. Je zde však očekáváno, že vzdálenost a rychlost je konstantní během jedné modulační periody. Proto musí být perioda vhodně zvolena.

$$f_{b+} = f_r - f_d \quad (4.8)$$

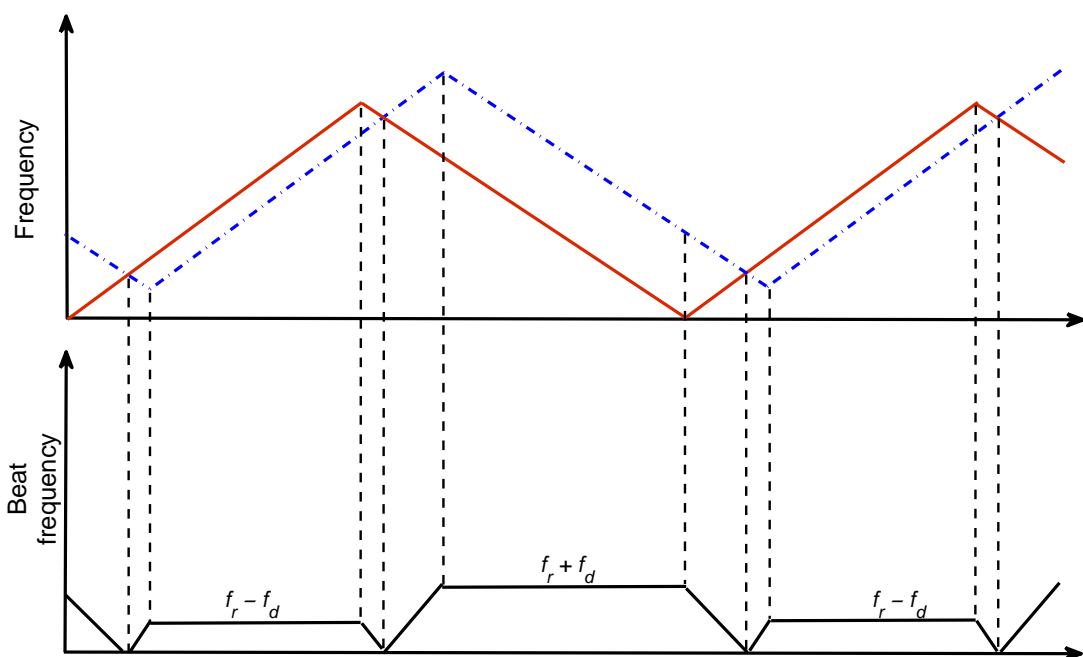
$$f_{b-} = f_r + f_d \quad (4.9)$$

Frekvence pro vzdálenost může být potom získána jako průměrná beat frekvence stoupající a klesající části, jak je možné vidět na vzorci 4.10 a Dopplerova frekvence se určí pomocí vzorce 4.11.

$$f_r = \frac{f_{b+} + f_{b-}}{2} \quad (4.10)$$

$$f_d = \frac{f_{b-} - f_{b+}}{2} \quad (4.11)$$

Po získání správných frekvencí lze vypočítat vzdálenost za pomoci již zmiňovaného vzorce 4.7 a rychlost lze určit z již také uvedeného vztahu 4.3.



Obrázek 4.4: FMCW trojúhelníková modulace signálu objektu v pohybu, kde červená čára představuje vysílaný signál a modrá přijatý, v dolní části znázorněná beat frekvence

4.3 Metody pro detekci více objektů

V předchozí části byly popsány metody a jejich způsoby určení vzdálenosti, popřípadě rychlosti v situaci, kdy se na měřené scéně vyskytoval pouze jeden objekt. V případě, kdy se před radarem vyskytuje více objektů, je potřeba použít komplexnější modulace pomocí kterých můžeme od sebe jednotlivé objekty rozeznat. Ve většině případů se využívá různých variant již uvedené trojúhelníkové modulace, jelikož její vlastnosti a výsledky jsou podávány s velkou přesností. Uvedené metody lze také použít jako korekce v případě jednoho objektu, kde je vyjádřen více rovnicemi.

I pouze samotná trojúhelníková metoda je schopna rozeznat více objektů v měřené scéně, avšak při pohybu může pravděpodobně dojít k tomu, že následná asociace frekvencí na stoupající a klesající části může být rozdílná, jelikož beat frekvence na obou stranách mohou být seřazeny v jiném pořadí vlivem Dopplerova posunu. Výsledkem je pak možnost, že bude zobrazeno více objektů, než ve skutečnosti na scéně je nebo objekty budou změřeny špatně. Při reprezentaci výsledných informací se mohou objevit neexistující objekty, které jsou označovány jako „duch“. V této části budou uvedeny metody, které slouží k eliminaci těchto nežádoucích vlastností.

Využívá se zde také takzvaného Range-velocity diagramu, který se hodí k lepší ilustraci situace. Vyjadřuje strmost jednotlivých úseků modulace (chirpu). Je to poměr hloubky a periody nastavené modulace, což se označuje jako *sweep rate*. Každá část je vyjádřena přímkou a jejich průnik vyjadřuje podle zvolených parametrů například na horizontální ose vzdálenost a vertikální rychlost měřeného objektu. V případě různých kombinací metod se na diagramu zobrazí více přímek, které pak při společných průnících určují, zda se jedná o reálný objekt.

Modulace tří a více částí

Tato metoda se skládá minimálně ze tří částí, které jsou poskládány v kombinaci lineárně stoupající a klesající částí (chirp). Buďto ve variantě up-down-up chirp nebo jako down-up-down chirp. V jednom případě se tedy může jednat o trojúhelník s přidanou hranou. Rozdíl zde spočívá v nastavení délky trvání modulační periody jednotlivým částem nebo modulační hloubky, popřípadě obojího. V situaci, kde při nastavování modulační periody mají první dvě části stejně dlouhou dobu trvání i modulační hloubku, pak třetí část má periodu alespoň dvakrát větší než obě předchozí dohromady. Pokud modulační perioda zůstává stejná, tak hloubka modulace musí být v třetí části nastavena na odlišnou hodnotu. Tato část byla čerpána z práce [13]

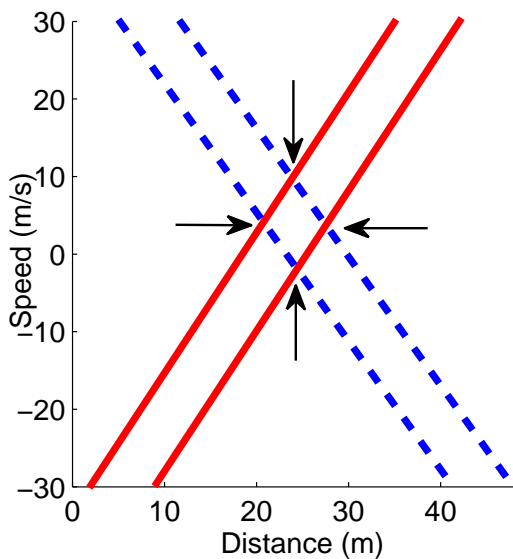
V případě, kdy je zvolena například variace down-up-down chirp a je správně nakonfigurována modulace, tak z naměřených dat pro jednotlivé úseky lze začít používat získané beat frekvence. Ty je možné z jednotlivých úseku převést na rovnice:

$$f_{b-}^1 = f_r + f_d = \frac{2\Delta f_1}{c\Delta t_1}r + \frac{2f_0}{c}v \quad (4.12)$$

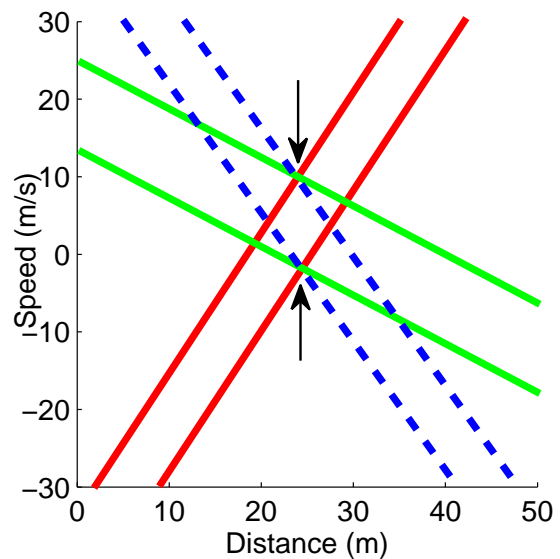
$$f_{b+}^2 = f_r - f_d = \frac{2\Delta f_2}{c\Delta t_2}r + \frac{2f_0}{c}v \quad (4.13)$$

Rovnice 4.12 vyjadřuje frekvenci down-chirpu, kde se jedná frekvenci vzdálenosti a Dopplerovu. Rovnice 4.13 potom vyjadřuje up-chirp, kde Δf_2 představuje modulační hloubku, c rychlost světla, Δt_2 modulační periodu a f_0 vysílací frekvence radaru.

Důvodem proč jsou zvoleny tři části je, že v případě, kdy je použita například pouze jedna, tak radar má k dispozici pouze jednu rovnici o dvou neznámých (v případě pohybu) a tím pádem může určit pouze jen vzdálenost nepohybujícího se objektu. Jednalo by se tedy o modulaci typu Sawtooth. Když se přidá další část opačně směřovaná, tak tím jsou získány dvě rovnice a radar je schopen určit i rychlost. V případě jednoho měřeného objektu je situace dostačující, ale v situaci kde se jich vyskytuje více může nastat problém.



Obrázek 4.5: Range-velocity diagram s čtyřmi potenciálními objekty



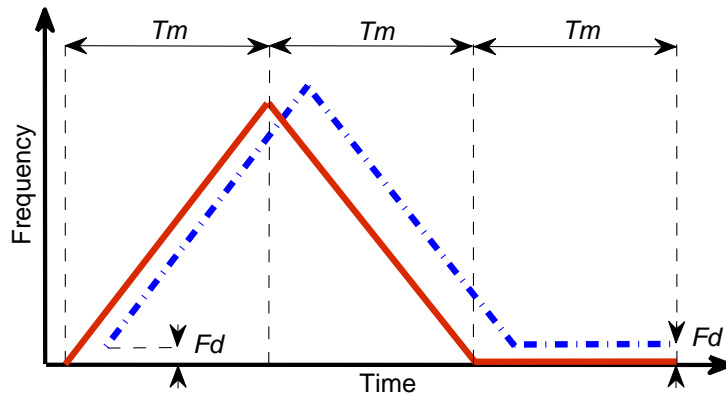
Obrázek 4.6: Range-velocity diagram o dvou reálných objektech

Na obrázku 4.5 je taková situace zobrazena, kde modrá přímka představuje down-chirp a červená up-chirp. Lze tedy vidět, že jsou zobrazeny celkem čtyři pohybující se objekty (průniky), ale nelze zatím určit, jestli se nejedná o falešné objekty. Aby bylo možné určit pravé objekty, je potřeba přidat další část, která má jiný sklon než předchozí dvě (nastavení modulace), jak je vidět na obrázku 4.6. Zde zelená přímka znázorňuje třetí down-chirp a protíná se společně v bodech, kde jsou ve výsledku jen dva reálné objekty.

Může ovšem nastat případ, kdy máme více objektů blízko u sebe a i s třetí částí nemusí být zcela jasné, jestli neprotíná i objekt, který pod ní nespádá. Proto se může využít i čtvrtá část, kde ve výsledném znázornění mohou vzniknout dva trojúhelníky. To nám přidá ještě další rovnici pro určení měřeného objektu a v Range-velocity diagramu bude objekt průnikem celkem čtyř přímk. To může výsledek ještě pravděpodobně upřesnit. Z hlediska frekvenční analýzy je varianta s dvěma trojúhelníky více náročná, jelikož se musí zpracovat celkem čtyři části. Pokud je ale dostatečně výkonné zařízení pro výpočet, tak je varianta s čtyřmi částmi vhodnější volbou, nehledí-li se na spotřebu.

Trojúhelníková modulace s Dopplerovou frekvencí

Metoda využívá trojúhelníkové modulace v kombinaci s nemodulovanou částí, která je určena pro zachycení čistého Dopplerova jevu. To umožňuje opět efektivně eliminovat objekty, které ve skutečnosti neexistují, ale na radaru se objevují. Je třeba vytvořit modulaci typu trojúhelník a nemodulovanou vlnu umístit až za něj, kde perioda může být stejně velká jako polovina trojúhelníku. Na obrázku 4.7 je možné vidět průběh signálu, který zvolená metoda používá. Následující část je přeložena z článku [5].



Obrázek 4.7: Modulace trojúhelníku v kombinaci se Dopplerovou částí

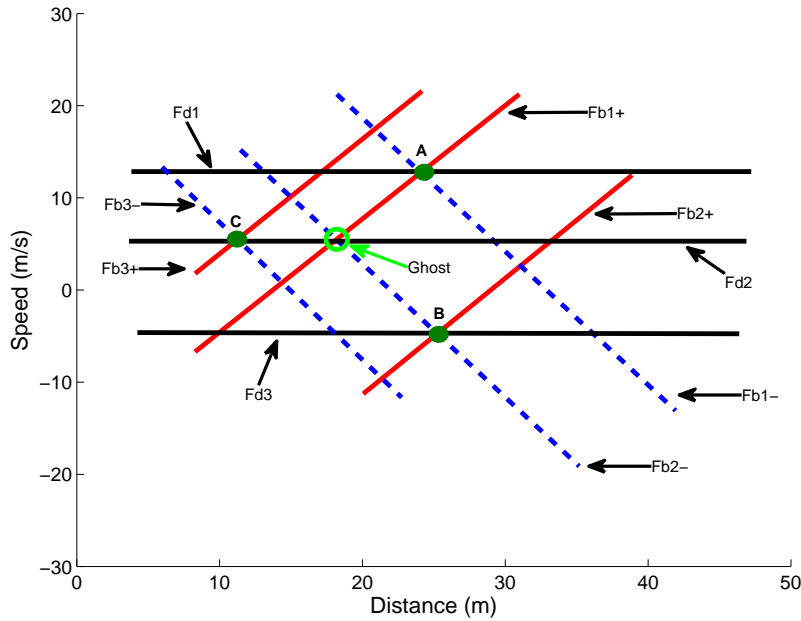
Modrá čára zde znázorňuje vyslaný signál a červená přijatý. Ilustrovaná situace zobrazuje objekt v pohybu, je tedy vidět, že v trojúhelníkové i nemodulované části dochází k frekvenčnímu posunu. Jednotlivé periody T_m , jak je znázorněno, mají stejnou dobu trvání.

V situaci, která může být obdobná jako na obrázku 4.5, tedy při více vyskytujících se objektech, je problém při přiřazení správné beat frekvence z f_{b_i+} (up-chirp) k f_{b-n} (down-chirp). Při následném dosazením do vzorců 4.10 a 4.11 to vede k nejasnostem, která frekvence ze stoupající části je přiřazena k té z klesající. Zde je využito právě té části signálu, která není modulována a je v ní zachycena čistá Dopplerova frekvence. Aby nejednozna-

čné přiřazení frekvencí f_r a f_d v rovnicích bylo správně dosazeno, tak je upraven vztah s Dopplerovou frekvencí jako vzorec 4.14.

$$f_{b-n} = f_{b+i} - 2f_{d_k} \quad (4.14)$$

Zde f_{d_k} jsou právě detekované frekvence nemodulované části (Doppler). Reálné objekty jsou označeny společným průnikem frekvencí z up-chirpu, down-chirpu a Dopplerovou. Situace se však může zkomplikovat, když se Dopplerova frekvence setká například s dvěma objekty a z toho jeden je falešný, protože vznikl kombinací frekvencí odpovídajících okolním objektům (obrázek 4.8).



Obrázek 4.8: Range-velocity diagram znázorňující situaci s třemi reálnými objekty a jedním falešným

V dané situaci lze vidět, že se zde vyskytuje celkem šest falešných objektů (průniků) a z toho i jeden, který se podle všeho zobrazuje jako pravý. Ostatních pět je možné vyloučit vlivem nemodulované frekvence, kdy se na ní nenachází. Pro vyřešení stávající situace je potřeba nový párovací algoritmus, který dokáže vyloučit i objekty na společné Dopplerové frekvenci.

V zmiňovaném algoritmu je up-chirp frekvence f_{b+i} použita jako referenční v kombinaci s f_{d_k} , což vyústí v rovnici 4.14 a korelační frekvence f_{bc} je vypočítána pomocí vzorce 4.15.

$$f_{bc_i} = f_{b+i} - 2 \sum_{k=1} f_{d_k} = [f_{bc_{i1}}, \dots, f_{bc_{ik}}] \quad (4.15)$$

Každý prvek f_{bc} je potom porovnán s frekvencí f_{b-n} a s porovnanými výsledky lze učinit konečnou volbu pravých objektů. Ta je znázorněna v tabulce 4.1, která je spojena s případem z obrázku 4.8.

Jak lze vidět tak f_{b+1} má přiřazeny dvě klesající frekvence a f_{b-2} naopak dvě stoupající. Potencionální objekt, který by mohl existovat dostal hlas (vyjádřeno hodnotou 1). Za před-

	f_{b-1}	f_{b-2}	f_{b-3}
f_{b+1}	1	1	0
f_{b+2}	0	1	0
f_{b+3}	0	0	1

Tabulka 4.1: Párovací tabulka po přidělení frekvencí

	f_{b-1}	f_{b-2}	f_{b-3}
f_{b+1}	1	0	0
f_{b+2}	0	1	0
f_{b+3}	0	0	1

Tabulka 4.2: Finální párovací tabulka po rozdělení na unikátní dvojice

pokladu, že každá část se stoupající frekvencí může být přiřazena pouze jedné klesající, tak lze vytvořit unikátní dvojice znázorněné v tabulce 4.2, kde již vidíme pouze pravé objekty a to celkem tři. Nicméně při finálním rozhodování o objektech může nastat situace, kdy vyloučíme pravý objekt se společnou frekvencí. Pro řešení se využívá spektrální hustota výkonu popsaná v následujícím příkladu.

V nejhorším případě se může stát, že všechny části se stoupající frekvencí mohou být spárovány s dvěma klesajícími frekvencemi. Jinými slovy u některého měřeného objektu je klesající či stoupající frekvence shodná s frekvencí jiného objektu. Není tedy možné identifikovat unikátní dvojice, protože při pokusu o odstranění máme ve výsledku více variant a tím vzniká riziko, že odstraníme i objekt, který existuje. Situace je ilustrována v tabulce 4.3

	f_{b-1}	f_{b-2}	f_{b-3}
f_{b+1}	1	1	0
f_{b+2}	0	1	1
f_{b+3}	1	0	1

Tabulka 4.3: Párovací tabulka s šesti potencionálními objekty

	f_{b-1}	f_{b-2}	f_{b-3}
f_{b+1}	1	0	0
f_{b+2}	0	2	0
f_{b+3}	1	0	1

Tabulka 4.4: Párovací tabulka se čtyřmi objekty s prolínajícími se frekvencemi

V takovém případě se v párování využívá hustota spektrálního výkonu přijatého signálu, jež nám u frekvenčního spektra určuje, jak je která složka výrazná. Lze očekávat, že klesající i stoupající frekvence přijatá od jednoho objektu má stejnou, či alespoň blízce podobnou hodnotu spektrální hustoty výkonu. Těchto hodnot lze využít k určení dvojice, která spolu nejvíce souvisí z předchozího výběru. V uvedeném příkladu mohou mít například korespondující hustoty výkonu frekvence f_{b+2} a f_{b-2} . Tím lze tedy jednoznačně tuto dvojici určit a označit ji jako pravou přidělením vyšší hodnoty výběru, jak je znázorněno v tabulce 4.4. Nyní je možné vyloučit páry (f_{b+1}, f_{b-2}) a (f_{b+2}, f_{b-3}) , protože jejich člen už byl spárován a má vyšší hodnotu. Jestliže se u ostatních objektů spektrální hustota výkonu liší, tak jejich beat frekvence jsou odrazem od více objektů. V probíraném příkladě jsou po finálním párování celkem čtyři objekty. Uvedená metoda je tudíž vhodná pro určení více objektů a to zejména v pohybu.

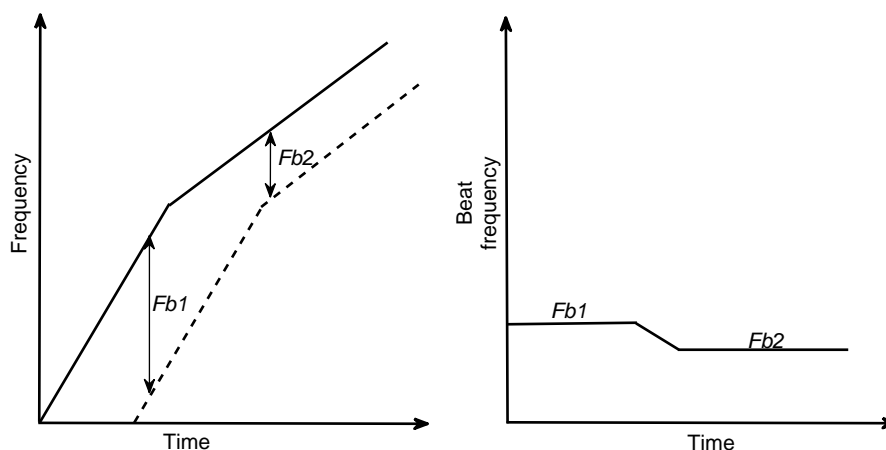
4.4 Chyby v měření

Během měření vzdálenosti se můžou objevit faktory, které ovlivní přijímaná data. Informace radarem získané potom mohou být zkreslené a ve výsledku je dosaženo mylných hodnot. Mezi ty nejvýraznější patří:

- Nelineární frekvenční modulace
- Únik signálu z vysílače
- Vliv použité techniky

Nelineární frekvenční modulace

Při určování vzdálenosti je důležité, aby modulace závisla na linearitě buď neustále stoupala či klesala a to v jenom souběžném bloku. Jestliže nebude lineární, například jako na obrázku 4.9, tak beat frekvence začne nabývat špatných hodnot a metoda pro určení vzdálenosti tím bude negativně ovlivněna. Text byl čerpán z práce [6].



Obrázek 4.9: Nelineární modulace a její vliv na beat frekvenci (překresleno z [6])

Jestliže k tomuto jevu dochází, tak jako částečné řešení může být zvětšení šířky modulace, čímž se problém částečně vylepší, ovšem zároveň se celková nelinearita prodlužuje, takže výsledná kvalita je stále nízká.

Řešení je spíše vázáno na hardware a to napětím řízený oscilátor (VCO). Jedním z řešení může například být metoda zvaná *Open loop correction*, která modifikuje u VCO napětí tak, aby vytvářelo lineární modulaci. K modulům jsou také často dodávány i softwarové nástroje, které se snaží jednotlivé body v lineární modulaci interpolovat pro hladší průběh.

Únik signálu z vysílače

Jeden z důležitých faktorů, jež je potřeba mít zabezpečený, je únik signálu z vysílače do přijímače. Může to být způsobeno příliš velkou energií vysílací antény a ten potom bočním

signálem může přijímač ovlivnit. U radarů s nízkou energií tento problém většinou nebývá.

Nejjednodušším řešením je izolovat od sebe antény pro vysílání a příjem. To problém ve velké míře vyřeší, ovšem i za takové situace může menší rušení opět nastat. Uvedenému problému je možno se nejlépe vyvarovat použitím modulu s dvěma anténami, které jsou od sebe separovány.

Vlivem použité techniky

Problém může i nastat v nedokonalosti samotné techniky, kde se v signálu při použití frekvenční modulace vyskytuje takzvaný parazitní jev. Ten se projevuje jako nízkofrekvenční signál, zhruba o frekvenci modulace.

Pro částečné utlumení tohoto jevu je vhodné vytvořit si kalibrační křivku. Ta je vytvořena nahráním vzorků, kdy radar je namířen do prázdna a následně se zobrazí pouze modulační průběh. Ve frekvenčním spektru pak lze vidět frekvence, které tento parazitní jev představují. Z dat lze pak zprůměrováním nasbíraných hodnot kalibrační křivku vytvořit. Při práci se signálem je možno tyto nežádoucí frekvence porovnat a v případě shody tento signál ignorovat. Jelikož se jedná většinou o frekvence nízké, tak pravděpodobně zkomplikují měření objektů, které se nachází v blízkosti radaru, protože jejich frekvence bude také v nízkém rozsahu.

Jinou možností může být nasbírání dat čistě na úrovni přijatých kanálů z radaru, opět jen se samotnou modulací. Z dat nakonec vytvořit průměrnou hodnotu signálu ze všech segmentů. Poté při následném zpracování signálu, kde již modulaci k měření používáme, tak od každého příchozího segmentu z výstupního kanálu tuto hodnotu odstraníme. Nicméně tento jev, nelze zcela eliminovat a při měření je potřeba na něj brát ohledy.

Kapitola 5

Implementace

Tato kapitola popisuje implementaci aplikace, která používá metody pro měření vzdálenosti popsané v kapitole 4.

Výsledný program byl koncipován jako rozšiřující modul do aplikace pana Ing. Maršíka, kde prověřené metody a postupy v programu Matlab umožnily efektivnější tvorbu aplikace.

5.1 Návrh řešení

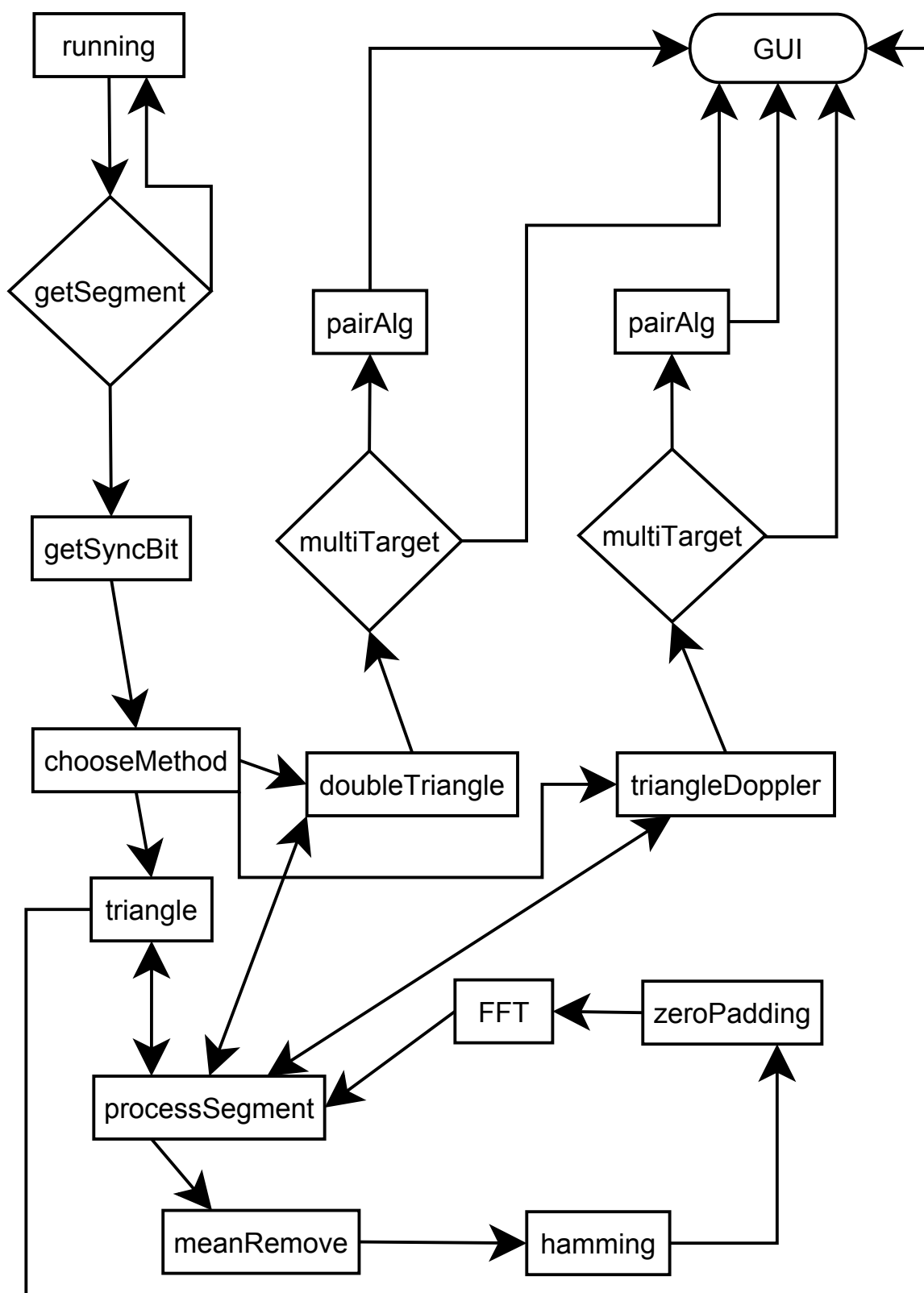
Při frekvenční modulaci jsou vytvářeny různé průběhy s nastavenou periodou a je nezbytné tyto úseky v přijatém signálu identifikovat synchronizačním bitem. Ten je reprezentován vysokou hodnotou, kterou přijatý signál nemůže nabýt. Data se tedy následně rozdělí do jednotlivých úseků o délce jedné modulační periody.

Libovolný modulační průběh sestává z určitých částí, které je od sebe nutné také oddělit, aby pro každý úsek mohla být vypočítána jeho příslušná frekvence. Každý segment je potřeba rozdělit na jednotlivé modulační části v závislosti na tom, jaký typ modulace byl zvolen. V testovaných metodách se jednalo o rozdělení na dva až čtyři úseky jednoho segmentu.

V signálu je také obsažena stejnosměrná složka vzniklá při převodu z analogové formy do digitální. Bez frekvenční modulace lze zmíněnou složku odstranit střední hodnotou signálu, ovšem zde jsou úseky ovlivněny i parazitním jevem. V případě, kdy byla odstraněna složka z celého segmentu, tak ve frekvenčním spektru se výrazně projevila parazitní frekvence. Je proto potřeba stejnosměrnou složku odstranit až pro jednotlivě rozdělené úseky, což částečně omezí výraznou špičku (peak) nežádанého jevu.

Na jednotlivé úseky se následně aplikuje Hammingova okenní funkce, aby byl vybraný úsek signálu zdánlivě periodický a tedy následně vhodný pro zpracování rychlou Fourierovou transformací. Pokud by se použil signál, který není periodický, tak ve výsledném frekvenčním spektru by se objevoval rozptyl (viz. obrázek 3.5). Aby byly špičky ve spektru přesněji umístěné, je dobré použít metodu zvanou zero padding, kdy na konec segmentu jsou přidány nuly a tím bude výsledné spektrum vyhlazené.

Po uvedených úpravách lze použít rychlou Fourierovu transformaci, která převede signál z časové domény do frekvenční a tím je získáno spektrum s frekvencemi použitelnými pro zvolené metody, kde lze již aplikovat postupy popsané v kapitole 4. Navrhnuté schéma aplikace je pak možné vidět na obázku 5.1



Obrázek 5.1: Aplikační schéma výsledného programu

5.2 Použité nástroje

V první fázi zpracování byl využit implementační nástroj Matlab. Ten umožňuje používat tradiční prvky programovacích jazyků a slouží k řešení velké škále vědeckých či technických problémů. Obsahuje také velkou podporu pro načítání různých typů souborů a poskytuje velkou sadu užitečných nástrojů pro jejich zpracování a analýzu. Proto je velmi vhodný pro úvodní testování a zpracování signálu z radaru před konečnou implementací v jazyku C++.

K výsledné implementaci bylo využito Qt knihovny, která je považována za jednu z nejpopulárnějších multiplatformních knihoven pro vytváření programů s grafickým uživatelským prostředím. Jedná se o knihovnu programovacího jazyka C++, ale existuje i pro jiné jazyky. Velkou výhodou Qt je velmi přehledně zpracovaná dokumentace.

K výpočtu diskrétní Fourierovy transformace byla použita knihovna FFTW3¹. Umožňuje zpracovat reálný signál i když je uveden v komplexní podobě. Jedná se o rychlou Fourierovu transformaci, která podává stejné výsledky jako diskrétní, ale výpočet je mnohonásobně rychlejší.

5.3 Implementace modulu

Modul byl implementován v jazyku C++, jakožto i aplikace do které byl směřován. Pro implementaci je v projektu vytvořena třída `AppSekeraRangeLFM`, která je potomkem abstraktní třídy `AppAbstractProc` (použita z původní aplikace) a umožňuje získávat segmenty zvolené velikosti. Daná třída má vytvořené vlastní vlákno, kde při aktivaci běží v nekonečné smyčce ve které žádá o segment. Pokud je segment dodán, tak se provede jeho zpracování.

Ze segmentu jsou extrahovány synchronizační bity a pomocí nich je rozdělen na požadované úseky. Zvolená část je poté předána na zpracování vybranou metodou, kdy jsou implementovány celkem tři varianty a to trojúhelník, dva trojúhelníky a trojúhelník s Dopplerovou frekvencí. Každá z nich si úsek rozdělí na potřebné části a na ty je použito zpracování v podobě odstranění stejnosměrné složky, aplikace Hammingova okna, přidání nul na konec úseku a provedení rychlé Fourierovy transformace.

Jednotlivé metody jsou zpracovány postupem popsáním v částech 4.2 a 4.3. U trojúhelníkové metody je umožněno zpracování pouze pro jeden detekovaný objekt. Pro metodu trojúhelníku s Dopplerovou frekvencí byla implementována varianta i pro více objektů, kde je vytvořen párovací algoritmus popsáný v části 4.3. Pro zvolení vhodných frekvencí u více objektů byla také vytvořena funkce pro hledání lokálního maxima s nastavitelným prahem. Tato funkce byla ovšem v konečné fázi využita u všech metod, jelikož bylo potřeba potlačit parazitní jev, který byl občas brán ve spektru jako nejvýraznější a zastínil požadované informace. Proto s implementovanou funkcí byly nalezeny druhé nejvýraznější frekvence. U metody dvou trojúhelníků i přes její nedostatky vlivem použitého modulu, byla detekce více objektů pro experimenty také začleněna.

Získané hodnoty jsou průběžně po zpracování zasílané na výstupní uživatelské rozhraní. Zde jsou zobrazeny dodané údaje pro tři nejvýraznější objekty v případě, že jich je více a zároveň je možné si zpětně prohlédnout záznam naměřených hodnot. Uživatel si může ještě upravit detailnější nastavení pro párovací algoritmus u více objektů, či detekci více objektů vypnout. Také je zde vložen graf s průběhem signálu, který je využit z původní aplikace.

¹<http://www.fftw.org/>

Kapitola 6

Vyhodnocení

Tato kapitola se zabývá prověřením jednotlivých metod, kde je zvolena nejvhodnější. Následuje testování implementované aplikace a je uvedeno konečné vyhodnocení získaných výsledků.

Bude také zmíněno jakým způsobem byla data získána a popis problémů, které byly zjištěny při používání radarového modulu.

6.1 Získání dat

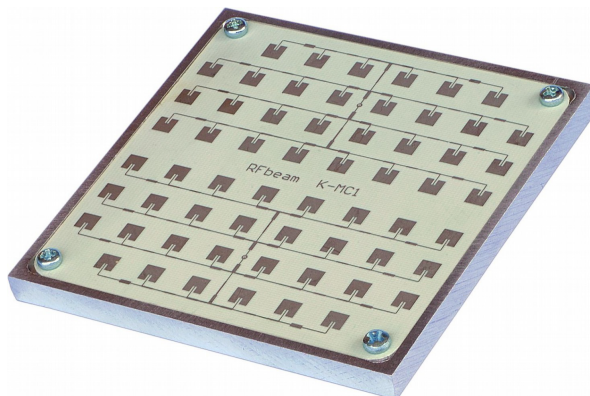
Data pro potřebnou analýzu byla získána pomocí radarového modulu K-MC1 od firmy RFbeam Microwave GmbH, který je zobrazen na obrázku 6.1.

Jedná se o FMCW radar, tedy se spojitou vlnou schopný frekvenční modulace. Umožňuje tudíž měřit vzdálenost i rychlost pozorovaného objektu, tím je například vhodný pro použití v dopravním odvětví či jako senzor. Vnitřní elektronika modulu odečítá výstupní frekvenci radaru od přijaté a tím dostáváme frekvence jen čistě naměřené. Signál je pak na výstupu předán v komplexní podobě a to zapříčiní, že odpovídající špička ve spektru bude pouze v kladné nebo záporné části. Naopak u pouze reálného signálu chybí imaginární složka a špička ve frekvenčním spektru se nachází symetricky v obou částech.

Jeho základní charakteristiky jsou:

- Vysílací anténa 24 GHz
- Dvě antény pro vysílání a příjem
- Možnost frekvenční modulace v rozsahu 180 MHz
- Zesílené i nezesílené výstupy obou kanálech I/Q
- Anténa s azimutem 25° a elevací 12° (viz. obrázek 2.1)
- RSW (Rapid Sleep Wakeup) metoda pro šetření energie
- Tenká tloušťka kounstrucke 6 mm

Přijatý signál je získán v analogové podobě, proto je potřeba ho převést na digitální s pomocí A/D převodníku za nastavené vzorkovací frekvence a na kvantování bylo konstantně nataveno 12 bitů, tedy maximálně bylo dosaženo 4096 kvantizačních hladin podle vzorce 3.2. Naměřená data se ukládala ve speciálním RRX formátu, kde kromě samotných naměřených



Obrázek 6.1: K-MC1 radarový modul (převzato z datasheetu [10])

dat jsou uloženy i informace o typu použitého radaru, vzorkovací frekvenci a modulační periodě. Při využití frekvenční modulace byl za každou periodou vložen synchronizační bit, aby jednotlivé úseky byly od sebe lépe rozeznatelné. Pro přesnost byl při měření využíván i trojúhelný reflektor, který má tu vlastnost, že signál odráží vždy přímo směrem z kterého byl přijat (viz. obrázek 6.6).

Byly vykoušeny oba výstupní kanály radaru, jak zesílený tak i nezesílený. Zjistilo se, že nezesílený kanál byl pro data vhodnější, protože zesílený vytvářel při přechodu na nedomulovanou část poměrně výraznou stejnosměrnou složku.

U použitého modulu se ukázalo, že zde dochází k parazitnímu jevu způsobeného frekvenční modulací, což je nízkofrekvenční signál, který může zkreslit výsledné měření na blízké vzdálenosti zhruba do jednoho metru. Při složitějších frekvenčních průbězích bylo potřeba také správné kalibrace pro lineární přechod modulace a to ve výsledku zanášelo drobné odchylky. Navíc bylo zjištěno, že při přeladování k vyšším frekvencím u modulu docházelo ke snižování vysílacího výkonu radaru, který mohl klesnout až k nule. Nebylo možné tak využít maximální rozsah modulace radaru. Zmíněné problémy bylo třeba konzultovat s vedoucím mé práce panem Ing. Maršíkem, který mě o situaci s modulem více informoval.

6.2 Prověření metod

Metody byly ověřovány v první fázi za pomoci nástroje Matlab, který poskytoval vhodné prostředky pro analýzu dat a jejich zobrazení v grafické podobě, to umožnilo situaci lépe analyzovat. Poté proběhlo testování dat na implementované aplikaci. Nasbíraná data bylo potřeba ještě upravit do patřičné podoby pro následnou frekvenční analýzu a aplikaci metod pro měření vzdálenosti.

Trojúhelníková modulace

Pro trojúhelníkovou modulaci se přijatý segment rozdělí na dva úseky o stejné velikosti. První část obsahuje úsek s frekvencí se zvyšující a druhý klesající. Z každé poloviny je určena nejvyšší frekvence (beat), která představuje nejvýraznější objekt před radarem. Získané frekvence pak lze využít k výpočtu vzdálenosti a rychlosti měřeného objektu postupem popsaným v části 4.2.

Na obrázku 6.2 je zobrazena trojúhelníková modulace se statickým objektem ve vzdálenosti sedmi metrů. Vrchní dvojice zobrazuje výstup z radaru složený ze dvou kanálů. Jak lze

vidět, segment je rozdělen na dvě části. Prostřední dvojice znázorňuje frekvenční spektrum dané části, kde je označená frekvence s nejvyšším výkonem následně použita k výpočtu. Pro ilustraci je zde zelenou čarou zobrazen parazitní signál oproti přijatému, který je znázorněn modře. Ve frekvenčním spektru přijatého signálu je vidět, že tento parazitní jev je zde opravdu obsažen a jeho hodnota je mírně navýšena pro lepší rozeznatelnost. V dolní části je ukázán Range-velocity diagram, kde zelená přímka znázorňuje down-chirp a červená up-chirp. Jejich průnik pak vertikálně znázorňuje, že objekt není v pohybu a na horizontální ose se nachází v uvedené vzdálenosti.

Modulace dvou trojúhelníků

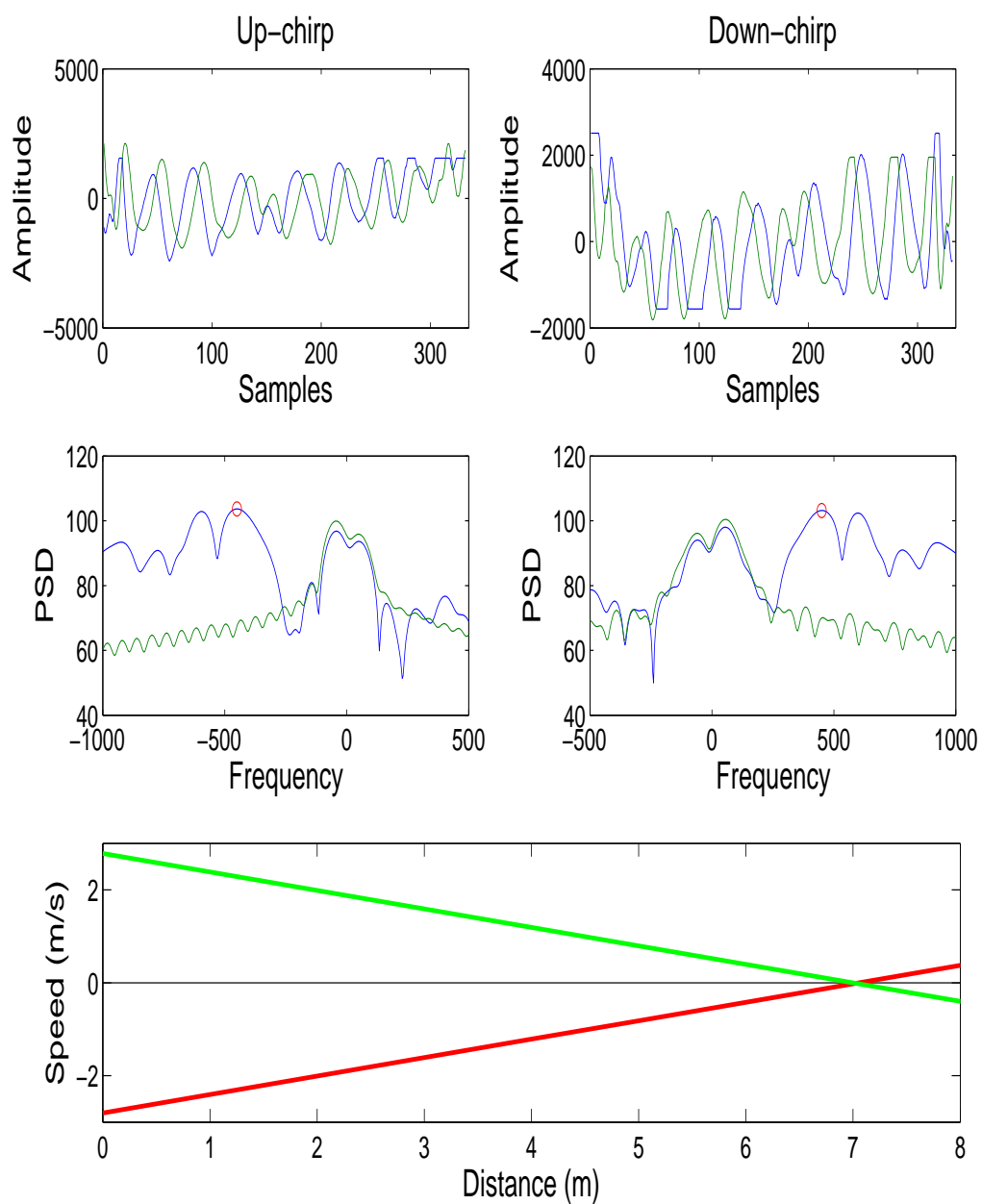
Jedná se o modulaci tří a více částí, konkrétně byly zvoleny čtyři a výsledná modulace je tvořena dvěma po sobě jdoucími trojúhelníky. Oba jsou nastaveny na stejnou modulační periodu, liší se však modulační hloubkou, kde druhý ji má nastavenou o polovinu nižší. Získáme tedy dvě dvojice frekvencí, kde výsledná rychlost i vzdálenost by měla být u obou identická.

Zpracovaná modulace je zobrazena na obrázku 6.3. Zde se jedná o objekt v pohybu směrem od radaru ve vzdálenosti $5.8m$ s rychlostí $0.6m/s$. Ve vrchní části lze vidět, že první dvojice je trojúhelník s větší modulační hloubkou a druhá dvojice pouze s poloviční oproti prvnímu. Ve frekvenčním spektru je možné pozorovat, že v případě pohybu od radaru vlivem Dopplerova posunu dojde v levé části ke zvýšení frekvence a v pravé ke snížení, což je možné vidět i na vrchním výstupu kanálů z radaru. V Range-velocity diagramu je pravý objekt znázorněn průnikem všech čtyř přímk. Zelená přímka s červenou v grafu zastupují trojúhelník s vyšší modulační hloubkou a modrá s růžovou druhý s menší hloubkou. Větší modulační hloubka se stejnou periodou, jak je vidět, vytvoří strmější přímku a tím se dají od sebe jednotlivé modulace rozeznat.

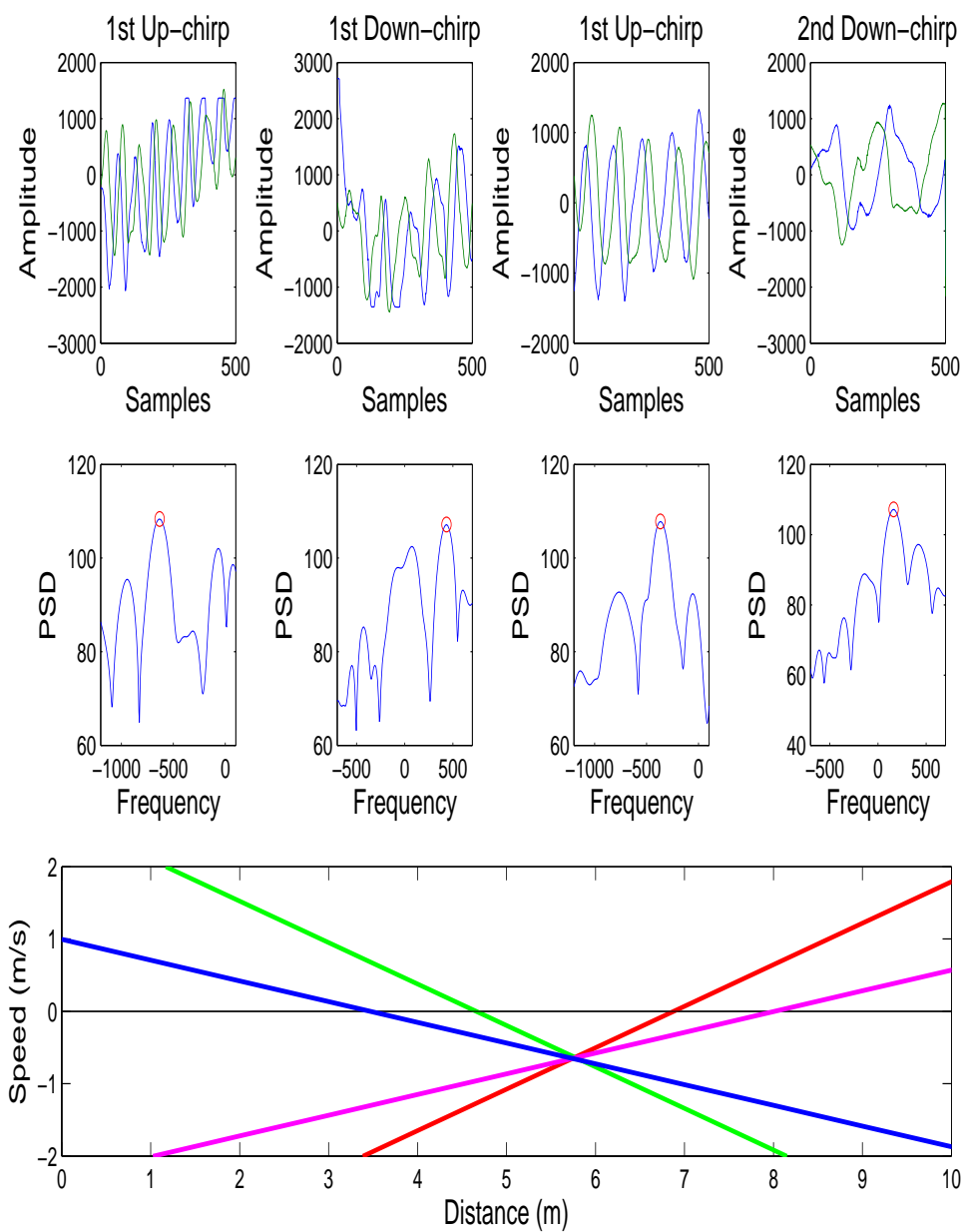
Trojúhelníková modulace s Dopplerovou frekvencí

Segment je rozdělen na tři stejně dlouhé úseky, kdy první dva obsahují modulaci typu trojúhelník a třetí část je nemodulovaná, tedy následně využívaná pro zachycení čisté Dopplerovy frekvence. Z trojúhelníkové modulace je získána frekvence pro rychlost a je porovnávána s frekvencí nemodulované vlny. Ta se ovšem vyskytne pouze pokud je měřený objekt v pohybu. U metody byl také nastaven minimální práh pro spektrální hustotu výkonu, který určuje při detekci více objektů jaké objekty (frekvence) budou přijaty pro analýzu.

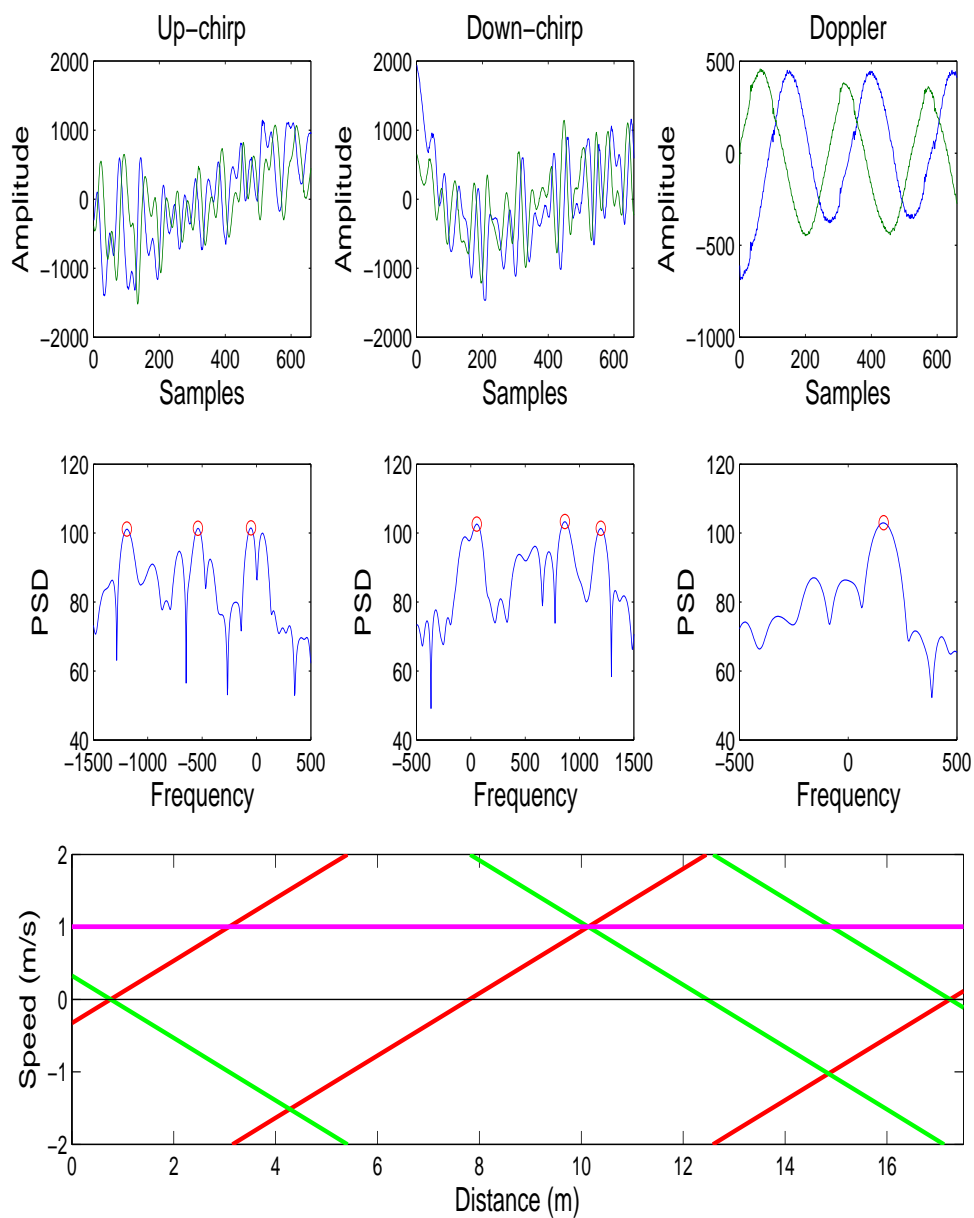
Analyzovaná data jsou znázorněna na obrázku 6.4. V dané situaci je objekt přibližující se k radaru ve vzdálenosti $10.2m$ s rychlostí $1m/s$ a dále jsou zde statické objekty. Jak lze na Range-velocity diagramu ve spodní části vidět, tak nejvzdálenější objekt se nachází ve vzdálenosti $17.2m$ a nejbližší v $0.7m$. Jak ovšem bylo uvedeno, tak vlivem parazitního signálu do jednoho metru použitý radarový modul podává nepřesné výsledky a žádný objekt se v této vzdálenosti nenacházel. Je tedy vhodné objekty do této vzdálenosti ignorovat, ovšem pro ilustraci vlivu parazitního jevu byl zde ponechán. Také vznikly průniky jiných frekvencí, které se zobrazují jako objekt v pohybu, jelikož ale však nemají společný průnik s Dopplerovou frekvencí, tak se objekty neberou v potaz. V prostřední části obrázku se nachází frekvenční spektrum a je možné si všimnout, že v okolí nízké frekvence je parazitní jev poměrně výrazný (červená značka) a spektrální hustotou výkonu se dostal i nad nastavený práh.



Obrázek 6.2: **Trojúhelníková modulace** se statickým objektem, kde vrchní dvojice představuje výstup z radaru, prostřední frekvenční spektrum a jako poslední je zobrazen Range-velocity diagram



Obrázek 6.3: **Modulace dvou trojúhelníků** s objektem pohybujícím se směrem od radaru, kde vrchní dvojice představuje výstup z radaru, prostřední frekvenční spektrum a jako poslední je zobrazen Range-velocity diagram



Obrázek 6.4: **Trojúhelníková modulace s Dopplerovou frekvencí**, kde se objekt pohybuje směrem k radaru s výskytem statických objektů. Vrchní dvojice představuje výstup z radaru, prostřední frekvenční spektrum a jako poslední je zobrazen Range-velocity diagram

6.3 Testování aplikace

Aplikace byla vyvíjena i ověřována v prostředí linuxové distribuce Ubuntu. Testování probíhalo na naměřených datech i při příjmu dat z radaru v reálném čase.

Statický objekt

V první části byla testována data pro jednotlivé objekty, kde se jednalo o situaci bez pohybu a jsou zde měřeny tři zvolené metody pro zjištění přesnosti. Jako pomůcka byl použit zmiňovaný trojúhelníkový reflektor. Naměřená data jsou reprezentována v tabulce 6.1

Ref. vzdál.	Trojúhelník	Dva troj. (1)	Dva troj. (2)	Troj. + Doppler
3m	3.20m	3.22m	3.31m	3.20m
4m	4.23m	4.25m	4.18m	4.25m
5m	5.20m	5.17m	5.21m	5.25m
17m	17.22m	17.24m	17.36m	17.23m

Tabulka 6.1: Výsledky naměřených hodnot statického objektu s vybranými metodami

U zobrazené tabulky je možné vidět, že od referenční vzdálenosti je jistý rozdíl a ten je způsoben tím, že nebylo možné u reflektoru přesně určit z jaké části jeho konstrukce bude signál odražen. Na stojanu byl v uvedené situaci reflektor umístěn v referenčních vzdálenostech, lze však z jeho tvaru (viz. obrázek 6.6) usoudit, že signál se mohl odrazit zhruba o 20cm dále, kde při dalších měřeních byly tyto hodnoty opět podobné, což tento odhad potvrdilo. V tabulce je vidět, že hodnoty modulace dvou trojúhelníků se rozcházejí a lze usoudit, že pro použitý typ radaru není vhodná. Ovšem i při porovnání ostatních hodnot je zde jistá nepřesnost, která je způsobena nelineární modulací radarového modulu.

Pohyblivý objekt

Dále byla vyzkoušena detekce jednoho objektu v pohybu včetně jeho rychlosti, kde nebyl využit žádný párovací algoritmus. Měřené situace jsou zobrazené v tabulce 6.2.

Ref. vzdál.	Trojúhelník	Dva troj. (1)	Dva troj. (2)	Troj. + Doppler
2m	2.02m 0.48m/s	2.04m 0.65m/s	2.83m 0.40m/s	2.01m 0.52m/s
4m	4.05m 0.86m/s	4.00m 0.83m/s	4.25m 0.80m/s	4.03m 0.84m/s
5m	X	X	5.21m 0.78m/s	5.09m 0.67m/s

Tabulka 6.2: Výsledky naměřených hodnot objektu v pohybu s vybranými metodami

V zobrazeném měření šlo o pohyb od radaru, takže rychlosti vycházely v záporných hodnotách, zde jsou však uvedeny v absolutní hodnotě. K referované vzdálenosti byla potom přiřazena nejbližší získaná hodnota. V prostředí, ve kterém bylo měřeno, se v okolí nacházely i další objekty (skříně, stoly, židle), v našem případě objekty nechtěné. Trojúhelníková metoda zde již ve větší vzdálenosti selhala, jelikož se její frekvence začaly prolínat s frekvencemi z okolních objektů. Metoda dvou trojúhelníků zde měla místy velké rozdíly v hodnotách a výsledky se u ní také rozcházejely. Metoda trojúhelníku s Dopplerovou frekvencí se tak oproti tomu projevila jako velmi spolehlivá, jelikož frekvence z trojúhelníku byly kalibrovány čistou Dopplerovou frekvencí a umožnily tak měřit přesněji. Celková délka trasy zasahovala až do vzdálenosti 16.6m a zhruba v okolí 12m již metoda začínala selhávat.

Je to dáno tím, že vlivem okolních objektů se potřebná frekvence mezi ostatními ztrácí a s větší vzdáleností se snižuje i celkový výkon odraženého objektu ve spektru. Následně pak v kombinaci frekvencí s podobným výkonem či dokonce vyšším, než měřený objekt, mohou být mylně vybrány ty okolní.

Více statických objektů

Následovalo testování nejvhodnější metody (trojúhelník s Dopplerovou frekvencí) v komplikovanější situaci. V následující části byla vyzkoušena situace s více statickými objekty najednou.

Id měření	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
1	17.23m	10.33m	8.10m
2	4.28m	17.21m	10.40m
3	7.55m	6.11m	12.7m
4	9.41m	4.70m	6.1m

Tabulka 6.3: Výsledky měření pro více statických objektů za použití metody trojúhelník s Dopplerovou frekvencí, seřazeny podle jejich výkonu

V uvedené tabulce jsou znázorněny tři nejvýraznější objekty v měřené scéně. První dvě měření byla na stejném místě s tím, že na podruhé byl přidán objekt na 4m. Třetí a čtvrté zobrazené měření pak bylo provedeno také na společném místě, ale radar byl na čtvrté měření posunut blíže k objektům. U druhé dvojice odrazy objektů byly poměrně slabší, jelikož se jednalo celkem o nevýrazné objekty (koš, židle). U první dvojice se naopak jednalo o objekty velice výrazné, o zeď a trojboký reflektor.

Pohyblivý objekt se statickými

V poslední řadě byla vyzkoušena situace s pohyblivým objektem ve scéně se statickými. Tabulka 6.4 ukazuje dosažené výsledky.

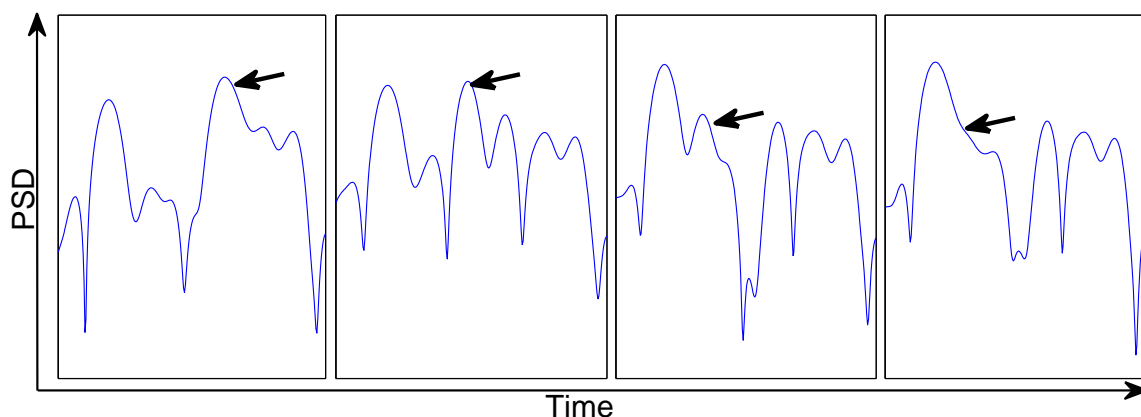
Id měření	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
1	6.58m 0.75m/s	10.34m	17.29m
2	9.09m 0.77m/s	6.11m	12.75m
3	8.14m 2.5m/s	4.75m	9.51m
4	3.75m -0.91m/s	5.81m 1.05m/s	X

Tabulka 6.4: Výsledky měření pro pohyblivý objekt se statickými za použití metody trojúhelník s Dopplerovou frekvencí, seřazeny podle jejich výkonu

V této části bylo nejpřesnější první měření, jelikož okolní objekty byly výrazné a pohyb byl prováděn s trojbokým reflektorem. Naopak u druhého a třetího měření se hodnoty často ztrácely, jelikož pohybující objekt byl pouze člověk a tím byl vůči okolí poměrně nevýrazný. Ve čtvrtém pak byl vyzkoušen pohyb dvou osob proti sobě, zde však hodnoty byly velmi slabé a většinou se oba objekty zároveň nezobrazily. Ze záznamu byly vybrány korespondující hodnoty pro demonstraci, že k zachycení občas došlo.

Dále bylo zkoušeno zachycení pouze osob, ale ve frekvenčním spektru byly většinou jejich špičky dosti nízké, a tím se jejich zachycení nedařilo. Navíc pohyb člověka je více komplexní a při jeho chůzi jsou hodnoty ovlivněny i pohybem jeho končetin.

Při detekci více objektů, kde se alespoň jeden objekt pohyboval, docházelo občas k falešným výsledkům. Důvodem je situace, kdy pohybující se objekt má ve svém blízkém okolí jiné objekty, jejichž hodnota spektrální hustoty výkonu je podobná nebo vyšší. Objekty potom začínají dohromady splývat. Pokud se objekt navíc vzdaluje od radaru, tak jeho výkon je stále menší a okolí postupně začíná být výraznější. Situace je ilustrována na obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Frekvenční spektrum s označeným pohybujícím se objektem, kde je postupně pohlcen okolními objekty (frekvencemi)

Záběry z testování a měření, včetně použitých nástrojů je možné vidět na obrázku 6.6.

6.4 Zhodnocení výsledků

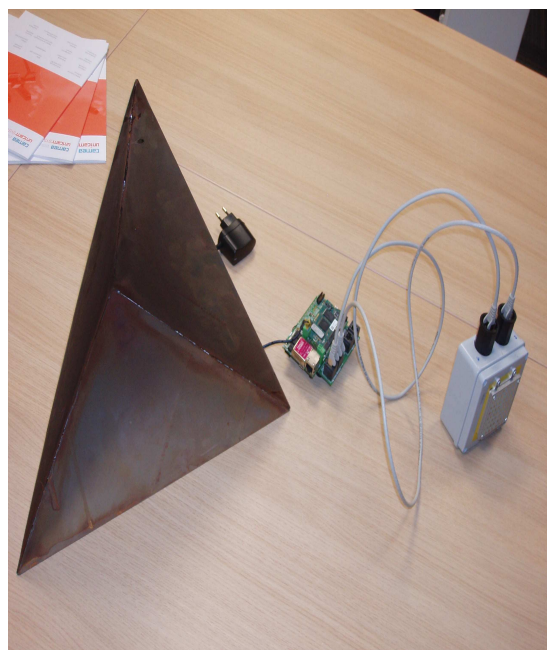
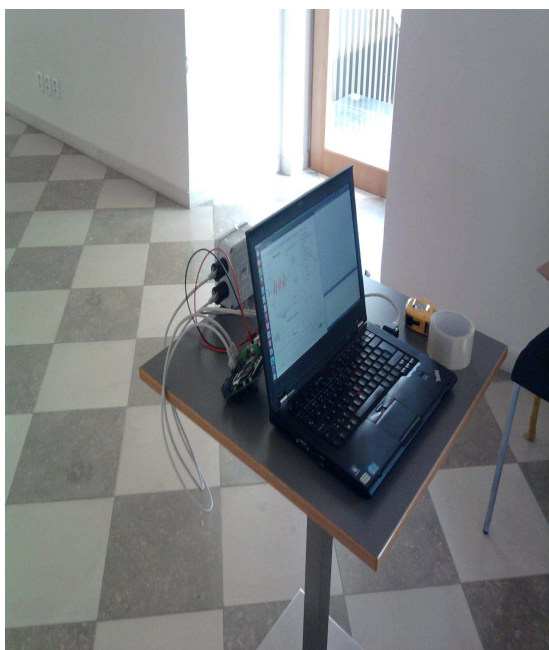
V této části bude uvedeno konečné vyhodnocení jednotlivých metod v rámci jejich spolehlivosti a výkonu ve výsledné aplikaci. V potaz je tedy brána jejich přesnost, náročnost na výpočet, využitelnost a také jejich chování v závislosti na použitém radarovém modulu.

Porovnání metod

Trojúhelníkové modulace podává velmi přesné výsledky co se týče vzdálenosti i rychlosti jednoho objektu, pokud nejsou v okolí žádné rušivé elementy. Pro více objektů, kde alespoň jeden vykonává pohyb však metoda není uzpůsobena a pro tuto situaci je nepoužitelná. Výpočetně je však velmi rychlá, jelikož sestává pouze ze dvou částí a žádné další náročné výpočty, či párování frekvencí zde není třeba.

Modulace dvou trojúhelníků se vlivem radarového modulu chovala místy nestabilně, kde výsledky se u obou trojúhelníků od sebe odlišovaly v extrému až zhruba o $0.8m$. Ovšem i zde bylo občas dosaženo poměrně shodných výsledků. Je nutné však poznamenat, že téměř vždy se oba trojúhelníky od sebe alespoň trochu odlišovaly. To bohužel celou tuto metodu silně diskriminuje, jelikož její hlavní úděl je v detekci více objektů, popřípadě korekce jednoho. Metoda v této situaci spoléhá na hodnoty obou trojúhelníků, které by měli být ve výsledku co se týče rychlosti i vzdálenosti shodné. Oproti samotné trojúhelníkové metodě náročnost výpočtu vzrostla minimálně dvakrát tolik, jelikož je složena ze čtyř částí a v případě více objektu je potřeba k sobě dané hodnoty spárovat. Metodu by bylo možné využít pro jeden i více objektů za předpokladu, že lineární přechody radaru budou perfektně zkalibrovány.

Trojúhelník v kombinaci s Dopplerovou frekvencí přejímá vlastnosti samotného trojúhelníku, ale zároveň jej rozšiřuje o možnost detekce více objektů v pohybu. Metoda je však



Obrázek 6.6: Záběry z měření a testování metod, kde lze vidět použité nástroje

schopná vylepšit hodnoty i pouze jednoho objektu. Při měření v prostředí, kde bylo více objektů a měřený objekt se v nich pohyboval, tak vlivem okolí jeho frekvence ve spektru s ním začínala splývat a nebylo možné vybrat vhodný vrchol. Zde právě lze využít Dopplerovy frekvence a pokusit se nalézt shodné hodnoty u frekvencí z trojúhelníku. Ovšem ne vždy se podařilo tyto hodnoty spárovat, záleží na nastaveném prahu pro spektrální hustotu výkonu pro začlenění frekvence na spárování. Také bylo třeba učinit jistou míru tolerance na porovnání frekvencí trojúhelníku a Dopplerovy, jelikož absolutně stejné hodnoty téměř nelze získat. Náročnost na výpočet oproti trojúhelníku vzroste minimálně o třetinu, ale zase je stále menší než u dvou trojúhelníků. Na zpracování jsou zde celkem tři části a následný párovací algoritmus pro frekvence. Tato metoda se vzhledem k vlastnostem modulu ukázala, že nabízí ze všech nejvíce.

Shrnutí

Ze zvolených metod je možné usoudit, že nejvhodnější metodou ve spojení s vlastnostmi radarového modulu je právě Trojúhelník v kombinaci s Dopplerovou frekvencí, který ze všech testovaných nabízel pouze jenom kladné vlastnosti. Výpočetně sice je náročnější než pouhý trojúhelník, ale nabízí celkově lepší možnosti pro měření. Metodu dvou trojúhelníků kvůli vlastnostem použitého radaru je možné vyloučit.

Při testování zvolené modulace, tedy trojúhelníku s Dopplerovou frekvencí se ukázalo, že v situaci, kdy je v okolí větší hustota objektů, bylo obtížné určit objekt v pohybu. Zejména docházelo ke komplikacím s rostoucí vzdáleností objektu. V případě s výraznými statickými objekty jsou však výsledky velmi dobré. Bylo důležité mít vhodně nastavený práh a toleranci k rozdílu frekvencí spolu s jejich výkonem, protože při benevolentním nastavení se do analýzy přijímalo nepřehledné množství hodnot a ty požadovaný cíl zastínily. Naopak při velice striktním nastavení nemusel měřený objekt prahem projít. Výstupní hodnoty použitého radaru je dle testování dobré brát s rezervou cca 10 cm.

Kapitola 7

Závěr

Cílem mé práce bylo vybrat vhodný algoritmus pro extrakci informace o vzdálenosti z radarových dat a následně jej implementovat. Tento cíl se mi podařilo splnit s tím, že jako nevhodnější metoda se ukázala modulace trojúhelníku v kombinaci s Dopplerovou frekvencí, která navíc umožňuje i měření rychlosti.

Výsledná aplikace však poskytuje použití i jiných metod za účelem jejich porovnání či vyzkoušení.

Během mé práce byly nastudovány informace nezbytné ke zpracování radarového signálu popsané v kapitole 3 a různé metodiky k odhadu vzdálenosti, které jsou uvedeny v kapitole 4. Vybrané metody byly průběžně prověřovány na nasbíraných datech a následně z nich byla vybrána ta nejvhodnější. Implementace aplikace je spolu s návrhem řešení rozebrána v kapitole 5. Aplikace byla testována na naměřených datech v sérii testů a ze získaných výsledků je uvedeno konečné vyhodnocení v kapitole 6.

Při sběru dat se projevily nedostatky radarového modulu u frekvenční modulace, které výsledné hodnoty částečně ovlivnily a zároveň omezily minimální detekovatelnou vzdálenost. Nicméně i skrze tyto nevýhody se podařilo z radaru získat data s přesností cca 10cm.

Se svoji prací jsem se zúčastnil konference a soutěže Student EEICT 2013, kde byl můj článek přijat a publikován ve sborníku. Ve finále uvedené soutěže jsem se v kategorii „Zpracování signálů, obrazů a dat“ umístil celkově na 2. místě.

V návaznosti na tuto práci by bylo zajímavé zdokonalit detekci více objektů před radarem, kde je třeba vytvoření algoritmu pro generování dynamického prahu. Ten by byl schopný analyzovat situaci a potlačit nežádané objekty s tím, že by práh nastavil na vhodnou hodnotu, aby se zachytila pouze požadovaná data.

Literatura

- [1] Aeroflex: Introduction to FFT Analysis. 2005.
URL <<http://www.aeroflex.com/ats/products/prodfiles/apnotes/192/888a.pdf>>
- [2] Bracewell, R.: *The Fourier transform and its applications*. Boston: McGraw Hill, 2000, ISBN 0-07-303938-1, 260 s.
- [3] Brandwood, D.: *Fourier transforms in radar and signal processing*. Boston: Artech House, 2003, ISBN 1-58053-174-1, 7–8 s.
- [4] Hwang, F.-K.: Dopplerův jev a rázová vlna.
URL <http://fyzweb.cz/materialy/aplety/_hwang/Doppler>
- [5] Hyun, E.; Lee, J.-H.: A method for multi-target range and velocity detection in automotive FMCW radar. In *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC '09. 12th International IEEE Conference on*, 2009, s. 1–5, doi:10.1109/ITSC.2009.5309873.
- [6] Kurt, S.: *Range resolution improvement of FMCW Radars*. Master of science thesis, Middle East Technical university, September 2007.
- [7] Lyons, R.: *Understanding digital signal processing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PIR, 2004, ISBN 0-13-108989-7, 83–87, 552–554 s.
- [8] Maršík, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. Ph.d. thesis statement, FIT VUT v Brně, January 2012.
- [9] Reichl, J.; Všetická, M.: *Encyklopedie fyziky*. 2013.
URL <<http://fyzika.jreichl.com>>
- [10] RFbeam GmbH: *K-MC1 Monopulse Radar Transceiver*. St. Gallen, 2011.
- [11] Skolnik, M.: *Introduction to radar systems*. New York: McGraw-Hill, 1980, ISBN 0-07-057909-1, 68–92 s.
- [12] Skolnik, M.: *Radar handbook*. New York: McGraw-Hill, 2008, ISBN 978-0-07-148547-0, 2–5 s.
- [13] Tutusaus, M. M.: *Evaluation of automotive commercial radar for human detection*. Master of science thesis, Helsinki University of Technology, November 2008.
- [14] Wolff, C.: *Radar Basics*. 2011.
URL <<http://www.radartutorial.eu/02.basics/rp06.en.html>>

Příloha A

Obsah DVD

K mé práci je přiloženo jedno DVD, které obsahuje zdrojové kódy vytvořené aplikace pro měření vzdálenosti, skripty pro analýzu napsané v programu Matlab a naměřená data z radarového modulu. V základním adresáři je umístěn soubor README s popisem složek a také MANUAL pro popis ovládání aplikace. Složky které DVD obsahuje jsou následující.

- **Latex** Obsahuje zdrojový text tohoto dokumentu včetně jeho výsledné podoby ve formátu PDF.
- **Scripts** Zde se nachází skripty vytvořené pro analýzu v programu Matlab. Jsou zde obsaženy i podsložky s nahranými daty.
- **SourceCodes** V této složce jsou zdrojové kódy výsledného modulu spolu s aplikací.
- **Records** Souhrn všech získaných dat z radaru, kde jsou obsaženy podsložky z různých nahrávání a to včetně starého formátu dat pro ukládání, který byl použit v počátcích práce.
- **Photos** Ve složce je obsažen výběr fotek z nahrávání pro ilustraci.